

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЧЕРКАСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
ІМЕНІ ГЕРОЇВ ЧОРНОБИЛЯ
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ
УКРАЇНИ

О. М. Землянський, К. І. Мигаленко, П. І. Заїка, В. І. Томенко,
С. С. Тарасов, О. О. Зобенко, М. Г. Томенко

СПЕЦІАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Навчальний посібник
для здобувачів вищої освіти
ВНЗ ДСНС України*

Черкаси 2022

УДК 628.741:621.312
ББК 31.2
С 71

*Рекомендовано до друку Методичною радою
ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
(протокол від «24» листопада 2022 року № 2)*

Спеціальна електротехніка: навчальний посібник /
О. М. Землянський, К. І. Мигаленко, П. І. Заїка, В. І. Томенко,
С. С. Тарасов, О. О. Зобенко, М. Г. Томенко – Черкаси: ЧПБ імені Героїв
Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. – 540 с.

Рецензенти:

Максим БОНДАРЕНКО – доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри приладобудування, мехатроніки та комп’ютеризованих
технологій Черкаського державного технологічного університету

Роман ШЕВЧЕНКО – доктор технічних наук, професор, начальник
кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій
Національного університету цивільного захисту України

Видання рекомендується як навчальний посібник для вивчення першої частини
дисциплін «Пожежна безпека електроустановок» і «Електротехніка та безпека
електроустановок». Розглядаються електричні кола постійного та змінного струмів;
електрика і магнетизм; електромеханічні та електромагнітні перетворювачі електричної
енергії; основи електропривода. Кожний розділ ілюстрований та містить приклади і
розв’язки конкретних задач.

Навчальний посібник розроблений для здобувачів вищої освіти галузі знань 26
«Цивільна безпека»; працівників цивільного захисту та інших інженерно-технічних
працівників, які здійснюють нагляд і контроль за безпекою та технічним станом
електроустановок.

Навчальний посібник може бути використаний широким колом фахівців, які
вивчають або вдосконалюють знання з електротехніки, безпеки електроустановок та з
охорони праці.

ЗМІСТ

Передмова	9
Вступ.....	11
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ-----	15
1.1. Від статичної електрики до електричного струму.....	15
1.2. Електричне поле	17
1.2.1. Закон Кулона і напруженість електричного поля.....	19
1.2.2. Потенціал електричного поля і електрична напруга	22
1.3. Електричний струм	24
1.4. Закон Ома. Електричний опір.	27
1.5. Електричні кола.....	33
1.5.1. Схеми електричних кіл.....	33
1.6. Електрорушійна сила	36
1.7. Закони Кірхгофа для розгалужених електричних кіл	39
1.8. Енергія в електричному колі	41
1.8.1. Потужність	43
1.8.2. Баланс потужності.....	45
1.8.3. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії (ККД).....	46
1.9. Коефіцієнт корисної дії електричного кола.....	47
1.10. Теплова дія електричного струму. Закон Джоуля-Ленца	48
1.10.1. Корисне використання теплової дії струму.....	50
1.10.2. Шкідлива та пожежонебезпечна теплова дія струму	51
Запитання та завдання для самоконтролю.....	57
ДОДАТКИ 1	58
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ -----	63
2.1. Загальні відомості.....	63
2.2. Нерозгалужені та розгалужені електричні кола.....	65
2.2.1. Нерозгалужені електричні кола з послідовним з'єднанням опорів	65
2.2.2. Переваги і недоліки кіл з послідовним з'єднанням опорів.....	70
2.2.3. Розгалужені електричні кола.....	71
2.3. Методи розрахунку електричних кіл постійного струму	77
2.3.1. Застосування законів Кірхгофа для розрахунку електричних кіл	77
2.3.2. Метод контурних струмів.....	79
2.3.3. Метод вузлової напруги.....	83
2.3.4. Методи перетворення схем	84
2.4. Передача енергії постійним струмом.	89
2.5. Пожежна безпека кіл постійного струму та забезпечення їх пожежної безпеки.....	92
2.5.1. Пожежна безпека електричних проводок.....	92

2.5.2. Заходи щодо попередження аварій і пожеж в колах постійного струму	95
2.5.3. Акумулятори та акумуляторні установки	99
Запитання та завдання для самоконтролю.	100
ДОДАТКИ 2.....	101
РОЗДІЛ 3. МАГНІТНЕ ПОЛЕ І МАГНІТНЕ КОЛО.....	103
3.1. Магнітні явища та характеристики магнітного поля	103
3.2. Електрика із магніта.....	106
3.3. Основні величини, що характеризують магнітне поле	107
3.3.1. Магнітна індукція.....	107
3.3.2. Магнітний потік, напруженість магнітного поля, магнітна проникність	109
3.4. Основні закони магнітних кіл.....	113
3.4.1. Закон Ома для ділянки магнітного кола	113
3.4.2. Перший закон Кірхгофа для магнітного кола	114
3.4.3. Другий закон Кірхгофа для ділянки магнітного кола (Закон повного струму).....	115
3.5. Аналогія між електричними і магнітними колами	116
3.6. Електромагнетизм і закон електромагнітної індукції	120
3.6.1. Електромагнітні явища	120
3.6.2. Електрика із магніту та закон електромагнітної індукції	121
3.6.3. Рух провідника в постійному магнітному полі.....	125
3.6.4. Принцип Ленца.....	126
3.6.5. Застосування закону електромагнітної індукції	126
3.6.6. Самоіндукція і взаємна індукція.....	128
3.6.7. Енергія магнітного поля	133
3.6.8. Сили, що діють в магнітному полі	136
3.6.9. Сили, що діють у магнітному полі	142
3.7. Теплова дія струму в електромагнітних пристроях та протипожежні заходи.....	145
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ	151
4.1. Загальні відомості про змінний струм.	151
4.2. Лінійні кола однофазного синусоїдного струму.....	153
4.2.1. Отримання синусоїдної електрорушійної сили (ЕРС) та основні характеристики синусоїдних електричних величин.....	153
4.2.2. Діюче та середнє значення синусоїдальних струму, ЕРС і напруги	164
4.2.3. Активний (R), індуктивний (L) і ємнісний (C) елементи у колі синусоїдального струму	167

4.2.4. Символічний метод аналізу і розрахунку кіл змінного синусоїдального струму.....	212
4.3. Трифазні кола синусоїдного струму.....	228
4.3.1. Історичні передумови до розробки та запровадження трифазних кіл	228
4.3.2. Основні визначення та одержання трифазної системи ЕРС	233
4.3.3. Способи з'єднання фаз джерела трифазного струму і співвідношення між його лінійними і фазними напругами.....	236
4.3.4. Трифазні кола з симетричними і несиметричними приймачами	242
4.3.5. Потужність трифазного кола.....	250
4.3.6. Коефіцієнт потужності трифазних споживачів.....	252
4.3.7. Приклади розрахунку трифазних кіл	256
4.3.8. Пожежна небезпека мереж змінного струму та протипожежні заходи.....	268
РОЗДІЛ 5. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ. -----	276
5.1. Загальні відомості про перехідні процеси в електричних колах лінійні електричні кола.	276
5.2. Усталений рух і перехідний режим електричного кола.....	279
5.3. Принципи виникнення перехідних процесів комутації.	281
5.4. Початкові умови	284
5.5. Властивості показникової функції. Поняття про сталу часу.	285
5.6. Класичний метод аналізу перехідних процесів.....	289
5.7. Перехідні процеси в колах RL.	292
5.7.1. Включення в коло RL гармонічної (синусоїдальної) ЕРС.....	296
5.8. Перехідні процеси в колах RC.	297
5.8.1. Включення в коло RC постійної ЕРС.....	298
5.8.2. Включення в коло RC гармонічної (синусоїдальної) ЕРС.....	301
РОЗДІЛ 6. ЕЛЕКТРОСТАТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ – ТРАНСФОРМАТОРИ -----	305
6.1. Загальні відомості.....	305
6.2. Конструктивна будова, види та основні визначення.....	308
6.2.1. Загальні визначення	308
6.2.2. Обмотки трансформатора.....	309
6.2.3. Основні електричні параметри і способи охолодження силових трансформаторів.	310
6.3. Принцип роботи трансформатора	315
6.4. Режим холостого ходу трансформатора.	319
6.4.1. Принцип роботи в холостому ходу.	319
6.4.2. ЕРС розсіювання і напруга розсіювання	320
6.4.3. Рівняння електричного стану первинної обмотки.	320

6.4.4. Векторна діаграма трансформатора	321
6.5. Робочий режим трансформатора	321
6.5.1. Робота трансформатора при навантаженні.	321
6.5.2. Рівняння магніторушійних сил.	323
6.5.3. Рівняння струмів.	323
6.5.4. Рівняння електричного стану.....	324
6.5.5. Приведення параметрів вторинної обмотки трансформатора до параметрів первинної.....	325
6.6. Векторна діаграма	326
6.7.1. Передумови складання схеми заміщення.	328
6.7.2. Електрична схема заміщення для приведенного трансформатора.	328
6.7.3. Спрощена схема заміщення.	329
6.8. Досліди холостого ходу і короткого замикання.	330
6.8.1. Мета дослідів.	330
6.8.2. Дослід холостого ходу.	330
6.8.3. Дослід короткого замикання.	331
6.8.4. Напруга короткого замикання	332
6.9. Вторинна напруга трансформатора.....	333
6.9.1. Вторинна напруга.....	333
6.9.2. Зміна вторинної напруги.	333
6.9.3. Зовнішня характеристика трансформатора.....	335
6.10. Втрати потужності і ККД трансформатора	335
6.10.1. Втрати постійні і змінні.....	335
6.10.2. Коефіцієнт корисної дії трансформатора.	336
6.10.3. Залежність ККД трансформатора від навантаження.....	336
6.11. Трифазні трансформатори.....	337
6.11.1. Загальні відомості.	337
6.11.2. Група з'єднання обмоток.	339
6.12. Паралельна робота трансформаторів.	343
6.12.1. Необхідність паралельної роботи.....	343
6.12.2. Умови паралельної роботи.....	344
6.13. Спеціальні типи трансформаторів.....	347
6.13.1. Зварювальні трансформатори	347
6.13.2. Автотрансформатори	348
6.13.3. Знижувальні трансформатори для переносних світильників (з лампами розжарювання) і роботи електрифікованих інструментів	351
6.13.4. Вимірювальні трансформатори	352
6.14. Пожежна небезпека трансформаторів та протипожежні заходи	355
6.14.1. Трансформатори з масляним охолодженням.....	355
6.14.2. Пожежа в трансформаторах.....	357

РОЗДІЛ 7. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ – ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ	359
7.1. Загальні відомості, основні співвідношення та характеристики електричних машин.....	359
7.2. Класифікація електричних машин.....	367
7.3. Електричні машини постійного струму	370
7.3.1. Призначення і області використання машин постійного струму.....	370
7.3.2. Призначення та практичне використання.....	370
7.3.3. Створення та практичне удосконалення машин постійного струму	373
7.3.4. Принцип дії, режими роботи та будова машини постійного струму	375
7.3.5. Генератори постійного струму. Параметри та характеристики для практичного використання.....	380
7.3.6. Двигуни постійного струму, параметри та характеристики для практичного використання	387
7.4. Електричні машини змінного струму.....	400
7.4.1. Передумови розвитку та використання електричних машин змінного струму	400
7.4.2. Призначення та області використання машин змінного струму.....	402
7.4.3. Трифазні асинхронні електричні двигуни	408
7.5. Синхронні двигуни.....	442
7.5.1. Синхронні генератори.....	442
7.6. Робота синхронної машини в режимі двигуна і синхронного компресора	454
7.6.1. Режим двигуна	454
7.6.2. Пуск в хід синхронних двигунів.....	455
7.6.3. Векторна діаграма синхронного двигуна, обертальний момент і потужність для $\omega = const$	457
7.6.4. Робочі характеристики синхронного двигуна.....	458
7.6.5. Синхронний компенсатор.....	460
7.6.6. Недоліки синхронних двигунів.....	460
7.7. Пожежна небезпека електричних машин та протипожежні заходи	461
7.7.1. Пожежна небезпека машин змінного струму.....	461
7.7.2. Пожежна небезпека машин постійного струму	462
7.7.3. Протипожежні заходи	463

РОЗДІЛ 8. ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ ВИРОБНИЧИХ МЕХАНІЗМІВ	470
8.1. Коротко про історію розвитку електроприводу.....	470
8.2. Загальні питання електричного приводу	471
8.3. Нагрівання і розрахунок потужності двигуна електропривода	481
8.3.1. Навантаження і навантажувальні режими двигунів електропривода.....	481
8.3.2. Теплові режими і загальні питання вибору потужності електродвигунів.....	482
8.3.3. Вибір потужності електричних двигунів для довготривалого незмінного навантаження (режим S1).....	486
8.3.4. Вибір потужності електричних двигунів для найбільш розповсюджених виробничих виконавчих механізмів	488
8.4. Апарати комутації, захисту та керування електроприводами.....	492
8.4.1. Статичні апарати комутації та керування.....	492
8.4.2. Автоматичні апарати управління	502
8.4.3. Керування електроприводами.....	508
8.4.4. Захист електроприводів від аварійних режимів	512
8.4.5. Пожежна небезпека електроприводів	530
8.4.6. Пожежно-профілактичні заходи.....	533
Післямова	537
Список використаної та рекомендованої літератури:	539

Передмова

Початок XXI століття характеризується бурхливим використанням електричної енергії у всіх галузях людської діяльності. Існування людини в сучасному цивілізованому суспільстві неможливо уявити без використання явищ, пов'язаних із перетворенням електричної енергії в інші види енергії: теплову, світлову, механічну, інформаційну та інші.

Кожна освідчена людина знає, що науково-технічний прогрес неможливий без використання електрики, неможливе впровадження у виробництво, медицину, побут та інші сфери людської діяльності досягнень науки і техніки та новітніх технологій. Переважній більшості людей відомо, як за допомогою електрики можна приготувати їжу чи задовольнити інші побутові потреби, але не кожний знає, що окрім великої користі, при відповідних обставинах чи умовах, електрика може принести людям великі неприємності.

Неправильне, необережне і некомпетентне поводження з електрообладнанням, електричними мережами та приладами може призвести до ураження електричним струмом, викликати пожежу чи інші аварійні ситуації. Електричний струм здатний не просто вбити людину, а навіть спопелити її.

Молоді люди, які тільки-но почали навчатися у закладі вищої, в здебільшого не можуть правильно оцінити сучасний стан і рівень розвитку обраної ними галузі науки і техніки, не завжди розуміють важливість опанування знань з електротехніки для обраної спеціальності. Важливо також зазначити, що електротехніка є базовою дисципліною для подальшого вивчення інших спеціальних дисциплін: автоматичних систем протипожежного захисту, систем автоматичного контролю та спостереження, засобів електричного зв'язку, пожежної безпеки електроустановок, електробезпеки на виробництві тощо.

Мета навчального посібника – поглиблення знань майбутніх спеціалістів для правильної оцінки зв'язків між знаннями основних законів електротехніки та практичне їх використання при перетворенні електричної енергії в інші види енергій і запобіганні, небезпечних проявів електричного струму під час експлуатації електроустановок та іншого електротехнічного обладнання.

Даний навчальний посібник складається з семи розділів: загальні поняття електротехніки; електричні кола постійного струму; магнітне поле і магнітне коло; електричні кола змінного синусоїдального струму; перехідні процеси в лінійних електричних колах; електростатичні перетворювачі електричної енергії – трансформатори; основи електричного приводу виробничих механізмів. В кожному розділі наведені приклади розрахунків конкретних задач з метою кращого засвоєння матеріалу.

Водночас автори свідомо не стали усувати деякі повторення, що мають місце в різних розділах навчального посібника, розраховуючи на те, що читачам так буде зручніше сприймати викладений матеріал. Таким чином, навчальний посібник побудований за модульним принципом, кожний розділ можна читати незалежно від інших розділів.

Навчальний посібник написаний на основі досвіду викладення дисциплін відповідного напрямку в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. У навчальному посібнику викладена перша частина курсу дисципліни «загальна електротехніка», яка є базовою для подальшого вивчення другої частини дисципліни «пожежна безпека електроустановок».

Навчальний посібник розрахований для підготовки здобувачів вищої освіти, які навчаються у закладах вищої освіти Державної служби України з надзвичайних ситуацій, а також він може бути корисним для студентів інших інженерно-технічних навчальних закладів, в яких вивчаються предмети з галузі електротехніки та охорони праці. Навчальний посібник може бути використаний як poradnik для працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій та іншого інженерно-технічного персоналу, які здійснюють нагляд за проектуванням, монтажем і безпечною експлуатацією електроустановок та іншого електротехнічного обладнання.

Автори вважають своїм приємним обов'язком висловити подяку рецензентам за цінні зауваження щодо викладу матеріалу даного посібника.

Вступ

Електротехніка – галузь науки і техніки, яка займається вивченням та застосуванням електротехнічних і магнітних явищ в практичній діяльності людини.

Перші ґрунтовні експериментальні дослідження електричних і магнітних явищ належать англійському лікарю–фізику Вільяму Гільберту (1544-1603 р.р.).

Віддавши належне янтарю – першому матеріалу, на якому спостерігалась електризація, він називає це явище електричним, взявши за основу грецьку назву янтарю – електрон. Отже, слово «електрика» втілено в життя за пропозицією лікаря В. Гільберта.

Більше двохсот років минуло після дослідів Гільберта і опублікування його праці «Про магніт, магнітні тіла і про великий магніт – Землю», коли Андре-Марі Ампер і Майкл Фарадей почали ґрунтовно вивчати електромагнітні явища. Практичне використання електроенергії почалося порівняно недавно, біля 100 років тому назад.

На розвиток електротехніки мали вплив багато вчених: Джеймс Максвелл, Емілій Ленц, Георг Ом, Густав Кірхгоф, Нікола Тесла, Томас Едісон, Чарльз Штеймець і багато інших. Промислове використання електричної енергії почалося, головним чином, після винаходу інженером німецької компанії АЕГ – Михайлом Осиповичем Доліво-Добровольським в 1891 році системи трифазного струму і побудови простого за будовою і надійного в роботі трифазного двигуна з короткозамкненим ротором. Винахід трансформатора спричинив революційні зміни в промисловості, та як забезпечив можливість застосування індивідуального електричного приводу різних машин, механізмів, верстатів.

Сьогодні без електричної енергії неможливо уявити розвиток сучасної цивілізації.

Здобутки людства в освоєнні космосу, міжпланетного зв'язку, мобільного зв'язку, створення всесвітньої мережі INTERNET, а також впровадження новітніх технологій у виробництво і багато іншого є результатом використання електричної енергії.

Отже, електрична енергія міцно й надійно ввійшла в наше життя. Водночас електромагнітні явища, що супроводжують процеси перетворення електричної енергії в інші види енергії при певних непрогнозованих обставинах, можуть стати дуже електро- та пожежонебезпечними та привезти до враження людини електричним струмом, або до великих аварій, іноді катастрофічного характеру з великими втратами людей і матеріальних цінностей.

Протягом останнього десятиріччя ХХ ст. на Землі кожного року реєструють біля 7 млн пожеж, на яких гинуть приблизно 70 тис. людей, а

1 млн людей отримують травми [1]. Але при цьому необхідно врахувати, що через різні обставини більша частина пожеж у світі не реєструється.

За даними ООН, сьогодні на планеті Земля проживає 6 млрд людей й існує біля 200 незалежних держав. На жаль, далеко не у всіх державах ситуацію з пожежною статистикою можна назвати задовільною, навіть у таких великих країнах як Індія, Пакистан, Мексика, і багато інших держав Азії, Африки, Центральної і Південної Америки.

Отже, загальну кількість пожеж, що виникають кожного року на нашій планеті можна оцінити приблизно в 10 млн., тобто кожні три секунди на Земній кулі виникає пожежа. Кожної години на пожежах гинуть 8 людей і декілька десятків людей отримують травми (тобто кожні 7,5 хв у світі на пожежі гине одна людина).

Однією із основних причин виникнення пожеж на виробництві і в побуті в більшості розвинених країн світу є несправність електрообладнання (це друга основна причина виникнення пожеж після необережного поводження з вогнем). За цих обставин 40 % пожеж від електроустановок припадає на силові та освітлювальні мережі.

У кінці ХХ ст. в деяких розвинених країнах світу відсоток пожеж через порушення правил побудови та експлуатації електроустановок складав: в Китаї – 23,8 %, США – 19,3 %, Чехії – 16,4 %, Німеччині – 13 % [1].

В Україні, незважаючи на те, що за останні 9-10 років намітилась тенденція до зменшення кількості пожеж, в цілому ця проблема залишається дуже гострою. Наприклад, у порівнянні з періодом середини 80-х років минулого століття, річна кількість пожеж сьогодні майже втричі вища і коливається в межах 40000-50000. Кількість загиблих від пожеж становить 2500-3500 людей на рік, серед них 120-150 дітей [16]. Більш значні людські втрати тільки у сфері безпеки дорожнього руху. Щодня в країні виникає в середньому біля 130 пожеж, на яких гине 7-10, отримує травми 140-150 людей. Збитки від пожеж складають понад 2 млрд грн на рік.

Так, наприклад, за статистичними даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій в Україні 10-13 тисяч пожеж виникають від джерел запалення електричного характеру..

Наприкінці ХХ ст. і вже на початку ХХІ ст. виникали декілька катастрофічних пожеж, в кожній із яких гинули десятки і сотні людей, відзначимо найбільш вражаючі в Україні та країнах ближнього зарубіжжя.

1986 рік – Україна. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції, що супроводжувалася вибухами та значними пожежами. Чорнобильська катастрофа є найтяжчою катастрофою техногенного характеру за всю історію людства. Аварія призвела до забруднення небезпечними для життя людини радіоактивними елементами більше 145

тисяч кв км території України та сусідніх держав, постраждало біля 5 мільйонів людей, забруднено радіоактивними нуклідами близько 5 тисяч населених пунктів. З них в Україні 2218 селищ та міст з населенням приблизно 2,4 мільйонів людей. Прямі збитки (втрати матеріально-майнових комплексів та окремих об'єктів економіки) лише у зоні відчуження на території України становили загалом 1385 мільйонів умовних одиниць.

Причина – помилки персоналу при проведенні недостатньо повно та правильно підготовленого електричного експерименту.

Винуватцем катастрофи є людський фактор.

1995 рік – Азербайджан. Пожежа в метро м. Баку. Найбільший за кількістю жертв інцидент в історії всіх метрополітенів світу. В результаті пожежі загинуло 286 пасажирів.

Причиною пожежі було займання двигуна коліщатих пар приводу руху поїзда.

Не краща статистика пожеж і в країнах далекого зарубіжжя [1].

У грудні 1994 р. в Китаї при пожежі в концертному залі загинуло 323 людини (із них 288 – школярі). У грудні 1995 р. в Індії під час пожежі в храмі загинуло біля 600 людей. У квітні 1997 р. під час релігійного мусульманського свята в Мецці (Саудівська Аравія) при пожежі загинуло 350 людей. В жовтні 1998 р. в Швеції при пожежі на дискотеці 60 людей загинуло і 120 людей було травмовано.

У травні 2000 р. в Нідерландах в результаті вибуху на заводі піротехнічних виробів виникла пожежа, яка знищила 400 котеджів, при цьому загинуло більше 20 людей і близько 900 людей одержали травми. Цей перелік, на жаль, легко продовжити.

Особливістю цієї драматичної ситуації є те, що приблизно в половині всіх випадків виникнення пожеж безпосередніми винуватцями стають самі люди.

Зазначимо, що в багатьох інших випадках виникнення пожеж, пов'язаних з несправностями електрообладнання, різних приладів тощо, винуватцями (безпосередньо або опосередковано) пожеж також є люди, або так званий людський фактор.

Звідси можна зробити висновок, що основним джерелом пожежної небезпеки на Землі є людина, її недостатня загальна та технічна культура, а в деяких випадках – її біологічні особливості.

Цікаво знати, що в більшості країн люди поводять себе відносно пожежної небезпеки практично однаково. Різниця між країнами пояснюється масштабами енергоспоживання, кліматичними умовами, особливостями національного, культурно-історичного розвитку і тощо.

Отже, людина, незважаючи на її освіченість і цивілізованість, поки що поводить себе в оточуючому нас світі досить несвідомо. І навпаки, якби кожна людина, відповідальна за свою справу поводи́ла себе свідомо,

то багатьох нещасть і бід, в тому числі пожеж, можна було б уникнути без особливих зусиль – вся проблема в розумінні людини, в її сумлінному ставленні до своїх службових та громадських обов'язків.

Отже, стосовно використання електричної енергії в будь-якій сфері людської діяльності, як показує практика, недбайливого і неповажного ставлення до працюючих електроустановок та електротехнічного обладнання електрика не вибачає.

Наведені вище приклади пожеж і катастроф показують, що працівникам Державної служби України з надзвичайних ситуацій, а також іншим працівникам, які здійснюють контроль за дотриманням правил будови та експлуатації електроустановок необхідні ґрунтовні знання з електротехніки та практичні навички щодо попередження небезпечних проявів в діючих електроустановках.

Запропонований навчальний посібник в доступній формі охоплює провідні питання електротехнічного характеру, з якими доводиться зустрічатися фахівцям вищезгаданих категорій в їх щоденній практичній роботі.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

1.1. Від статичної електрики до електричного струму

Як відомо, від пізнання до практичного використання будь-якого фізичного явища, минає чимало часу. Не є винятком опанування людством природних електромагнітних проявів.

За тисячу років до нашої ери в Південно-Східній Азії люди використовували природні магніти для визначення сторін світу (магнітний компас).

Перша звітка про прояви статичної електрики відноситься VI ст. до н. е., коли Фалес із Мілета (острів у Середземному морі), натираючи шматок янтарю шерстю, спостерігав за тим, як той притягує до себе невеликі предмети. Причиною цього явища, як потім з'ясувалося, стало те, що при натиранні янтарю йому надавався електричний заряд.



Фалес Мілетський (625-547 рр. до нашої ери) давньогрецький філософ, математик і вчений, родоначальник античної філософії і науки; в стародавності шанувався як один із «семи мудреців Греції».

Фалес походив із знаменитого фінікійського роду. У своїй творчості поєднував питання практики з теоретичними проблемами, що стосувалися проблем Всесвіту.

Фалеса вважають першим грецьким астрономом. Він передбачив сонячне затемнення (28 травня 585 р. до н. е.). Йому належить заслуга стосовно визначення часу сонцестояння і рівнодення, щодо встановлення тривалості року в 365 днів.

Фалес також має великі заслуги у створенні наукової математики. У нього вперше в історії математики зустрічається доведення теорем. Вважається, що Фалес першим познайомив греків з геометрією. Йому належать докази таких положень: 1) коло поділяється діаметром навпіл; 2) в рівнобедреному трикутнику кути при основі рівні; 3) при перетині двох прямих утворювані ними вертикальні кути рівні; 4) два трикутники рівні, якщо два кути і сторона одного із них рівні двом кутам і відповідній стороні другого.

Він вперше запропонував спосіб визначення висоти різних предметів і споруд, зокрема єгипетських пірамід, за довжиною тіні, коли сонце піднімається над горизонтом на кут в 45° .

Фалес першим спостерігав і описав прояви статичної електрики при натиранні янтарю шерстяною тканиною.

В XVII ст навчилися заряджувати крім янтарю і інші тіла, за допомогою електростатичної машини. Першу електростатичну машину в 1660 році побудував німецький фізик О.Геріке. Його машина – це куля із сірки, закріплена на металевій осі, вона приводилася в рух нескладним механізмом. Підтримуючи кулю руками, її можна було заряджати і відводити заряд на дослідне тіло. Численні досліди, проведені О. Геріке, в багатьох випадках сприяли з'ясуванню суті електрики: він встановив закони магнітного тяжіння та відштовхування в найпримітивнішому вигляді і першим спостерігав електричну іскру.



Франклін Бенджамін (1706-1790) – американський фізик, політичний і громадський діяч. Він не тільки пояснив дію електростатичної машини, але і навчив людей рятуватися від удару блискавки своїми знаменитими дослідженнями в області атмосферної електрики. У 1750 році винайшов блискавковідвід, у 1753 році довів електричну природу блискавки і тотожність земної і атмосферної електрики.

В 1746-1754 рр. виконав ряд експериментальних досліджень, які принесли йому світову популярність. Пояснив дію лейденської банки (лейденська банка – електричний конденсатор, в якому діелектриком, що розділяє обкладки конденсатора, є скляна стінка банки, а роль обкладок виконує металева фольга, якою банка обклеєна з обох сторін. В наш час лейденські банки використовуються, головним чином, з метою демонстрацій у кабінетах фізики).

Ф. Бенджамін побудував перший плоский конденсатор із двох паралельних металевих пластин, розділених скляною прокладкою.

Ф. Бенджаміном вперше було введено поняття додатної і від'ємної електрики (заряду) і їх позначення як плюс «+» і мінус «-», а також відкрито закон збереження електричного заряду.

Б. Франклін був першим, хто дав назву «провідник», «конденсатор», «заряд», «розряд», «обмотка».

Б. Франклін є автором низки технічних винаходів, зокрема застосування електричної іскри для вибуху пороху.

Б. Франклін був не тільки визначним фізиком, а й відомим політичним і громадським діячем. Відіграв значну роль в боротьбі Північно-Американських колоній за незалежність, брав участь в складанні «Декларації незалежності» і розробці конституції США, яка діє і сьогодні.

В 1800 році видатний італійський фізик і фізіолог А. Вольта створив першу в історії електричну батарею, яка одержала назву вольтів стовп. Він

складався із високого стовпа пластинок, які знаходились одна на одній таким чином, що дві пластинки із різних металів (одна мідна, друга цинкова) розділялись суконною прокладкою просоченою розчином мідного купоросу. При з'єднанні обох кінців батареї металевим дротиком (провідником), що утворював шлях для руху носіїв зарядів (замкнене коло), по ньому почав протікати електричний струм, внаслідок хімічної реакції в розчині мідного купоросу. Утворення першої електричної батареї і одержання струму в замкненому колі було подією величезної важливості, яка дала поштовх подальшому дослідженню електричних явищ і була початком історії або першим етапом розвитку електротехніки. З цього часу електричний струм стає предметом пильного вивчення багатьох вчених, а вчення про електрику розвивалось настільки швидко, що менше ніж за століття воно стало не просто частиною фізики, але стало основою електричної цивілізації. Після відкриття електричного струму з'явилися винахідники, які спробували використати нове явище для потреб людини.

Першим винаходом, який знайшов широке практичне використання в сфері людської діяльності був електричний телеграф, за допомогою якого здійснювалась передача по проводах на великі відстані буквено-цифрової інформації телеграм. Основи телеграфного зв'язку успішно розробляли в 30-х роках XIX ст. винахідники П. Шілінг і Б. Якобі, пізніше – американський винахідник Т. Едісон і інші. Перше письмове телеграфне повідомлення із міста Вашингтона до міста Балтімор (США): «Дивні справи твої, Боже!» було відправлено Семюелем Морзе, американським художником, винахідником електромагнітного письмового телеграфа, 24 травня 1844 року.

Телеграф слід віднести до одного із найважливіших винаходів в історії цивілізації, тому що разом із ним людство розум отримало величезну перемогу над відстанню.

Окрім того, що телеграф відкрив нову віху в історії зв'язку, винахід був важливим, адже тут вперше і в достатньо значних масштабах була використана електрична енергія. Саме творцями телеграфу вперше було доведено, що електричний струм можливо змусити працювати на благо людини і зокрема для обробки і передачі інформації.

В сучасному визначенні електротехніка – галузь науки і техніки, пов'язана із застосуванням електричних і магнітних явищ для перетворення речовин і енергії, обробки матеріалів, обробки та передачі інформації тощо, що охоплює питання одержання, розподілу та використання електричної енергії в практичній діяльності людства

1.2. Електричне поле

В широкому розумінні терміном «поле» позначається сфера дії якої-небудь фізичної величини. Якщо ця фізична величина характеризується

тільки своїм значенням (величиною), то таке поле називається скалярним (наприклад, розподіл температури). Якщо ж фізична величина характеризується і значенням, і напрямом, то її поле називається векторним (наприклад: сила, швидкість руху, прискорення і тощо).

Векторне поле можна зображати графічно за допомогою ліній поля. Напрямок ліній поля вказує напрям векторної величини, а густина ліній поля пропорційна значенню цієї величини або напруженості поля.

Для електротехніки найбільш важливі значення мають електричне, магнітне і електромагнітне векторні поля.

Електромагнітне поле сучасна наука характеризує як особливу форму матерії (іншими словами, як деяку фізичну реальність), якій притаманні ряд властивостей: електромагнітне поле безперервно розподіляється у просторі, в пустоті поширюється зі швидкістю світла (300000 км/с) і володіє здатністю силової дії на заряджені частинки і струми, в процесі якої енергія поля перетворюється в інші види енергії (теплову, механічну та інші). Заряджена частинка володіє електромагнітним полем, однак саме поле може існувати окремо від частинки. Прикладом цьому є частинка (квант) світла – фотон і електромагнітне поле, яке випромінює антена передавача.

Електричне поле – це поодинокий випадок електромагнітного поля, коли джерелами поля є нерухомі електричні заряди.

Нехай ми маємо заряджене нерухоме провідне тіло. Електричні елементарні від'ємні заряди, які входять до складу атомів і молекул речовини тіла і утворюють повний заряд тіла, знаходяться в середині його у безперервному русі. Але навіть на дуже маленькій відстані від поверхні тіла магнітні поля окремих додатних і від'ємних частинок заряду взаємно компенсуються і через це результативне магнітне поле навколо зарядженого нерухомого провідного тіла практично відсутнє. Навпаки, навколо нерухомого сталого магніту знаходиться тільки магнітне поле, а електричне поле відсутнє. Це дає нам можливість окремо розглядати і вивчати електричне і магнітне поля.

Зазначимо, що теорія електромагнітного поля була вперше викладена англійським вченим Джеймсом Максвеллом в його праці «Трактат про електрику і магнетизм», що була видана у 1873 році.



Максвелл Джеймс Клерк (13.06.1831-05.11.1879) – видатний англійський вчений. Основні його роботи присвячені електродинаміці, молекулярній фізиці, механіці та іншим наукам. Найбільшим науковим досягненням Максвелла є, створена ним в 1860-1865 рр., теорія

електромагнітного поля. Він першим у світі довів і математично обґрунтував існування у вільному просторі електромагнітного випромінювання (електромагнітних хвиль) і їх розповсюдження у просторі зі швидкістю світла.

Максвелл мав велику кількість досягнень у різних галузях знань – від першої у світі кольорової фотографії до розробки способу радикального виведення із одягу жирних плям.

1.2.1. Закон Кулона і напруженість електричного поля

Електричне, або, як його ще називають, електростатичне поле відноситься до так званих стаціонарних силових полів, які характеризуються тим, що вони не змінюються з часом. Таким чином, джерелами електростатичного поля є електричні заряди, розподіл яких у просторі зберігається незмінним. З практичної точки зору постійний розподіл електричного заряду – неможливий, тому що всі речовини у деякій мірі мають електропровідність, галузь спостережень значень електропровідності надзвичайно велика. Водночас всі речовини і матеріали можна розділити на дві категорії: діелектрики та провідники. Електропровідність діелектриків занадто мала у порівнянні з електропровідністю провідників. Так, наприклад, електропровідність скла в 10^{19} разів менша електропровідності міді. При розв'язанні електростатичних практичних задач діелектрик сприймається ідеальним, тобто його електропровідність приймається рівною нулю. Провідники ж являються тілами, всередині яких електростатичне поле існувати не може, оскільки в них внаслідок високої провідності не може існувати сталого розподілу вільного об'ємного електричного заряду. Вільний заряд розподіляється тільки по поверхні провідника, причому таким чином, що поле у будь-якій точці всередині провідника дорівнює нулю. Електростатичне поле зарядженого провідника спостерігається в діелектричному середовищі навколо провідника. Оскільки всередині провідника електростатичне поле існувати не може, то поверхня провідника у будь-якому випадку розподілення зарядів як на його поверхні, так і в діелектрику, що оточує провідник діелектрик, є природною межею електростатичного поля, що спостерігається в оточуючому діелектрику, що оточує провідник.

В основі кількісної теорії електростатичного поля лежить закон Кулона, встановлений методом проведення дослідів. Згідно з цим законом сила взаємодії між двома точковими зарядами Q_1 і Q_2 , розташованими в однорідному ізотропному середовищі (практично між двома зарядами, лінійні розміри яких занадто малі у порівнянні з відстанню між ними), зображається формулою:

$$\vec{F} = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi \cdot \epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}. \quad (1.1)$$

У Міжнародній системі одиниць СІ: (метр, кілограм, секунда, ампер)

у формулі (1.1) : r – відстань між зарядами в метрах; $\frac{\vec{r}}{r}$ – одиничний вектор, за напрямом по прямій, що з'єднує заряди Q_1 і Q_2 , котрі вимірюються в кулонах; ϵ – (епсілон) діелектрична проникність оточуючого заряду середовища, вимірюється у фарадах на метр, причому ϵ в усіх діелектриків більше одиниці (гума – від 3 до 6; фарфор – 6; скло – від 4 до 16), для вакууму $\epsilon = \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м, або $A \cdot c / B \cdot m$

Сила F водночас буде в ньютонах.

Взаємодія зарядів описана за допомогою зображення навкруги кожного заряду деякого силового поля, яке можна назвати електричним полем.

Кількісно електричне поле характеризується вектором напруженості \vec{E} , що визначає (як за величиною, так і за напрямом) силу, з якою поле діє на одиничний додатній (точковий) заряд при знаходженні його у даній точці поля. Для одиничного точкового заряду Q_1 за законом Кулона будемо мати:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}, \quad (1.2)$$

де \vec{r} радіус-вектор, проведений від заряду Q в точку m , в якій визначається \vec{E} .

Таким чином, напруженість електричного поля в даній точці є вектор, чисельна величина якого дорівнює відношенню сили F , що діє на додатній заряд, розташований у цій точці до величини цього заряду, а напрям співпадає з напрямом сили, тобто

$$\vec{E} = \frac{F}{Q}. \quad (1.3)$$

Таким чином напруженість – силова характеристика електричного поля. Одиниця вимірювання напруженості електричного поля

$$[\vec{E}] = \frac{H}{K_L} = \frac{H \cdot m}{K_L \cdot m} = \frac{Дж}{K_L \cdot m} = \frac{B}{m}.$$

Для наочного зображення електричного поля користуються лініями напруженості електричного поля або силовими лініями.

Силкові лінії одиничного точкового заряду це - радіальні прямі, проведені через точку, в якій знаходиться цей заряд, так як у будь-якій точці оточуючого простору сила, діюча на заряд, має напрям по прямій, що з'єднує центри зарядів або заряджених тіл.

Якщо заряд додатній, силкові лінії мають напрям від центру заряду (тіла) (рис. 1.1,а). При від'ємному заряді лінії напруженості мають напрям до центру заряду (тіла) (рис. 1.1,б).

Якщо розглядати електричне поле, утворене групою зарядів або групою заряджених точкових тіл, то напруженість результтивного поля у кожній точці дорівнюватиме геометричній сумі напруженостей полів, обумовлених всіма зарядами.

На рис. 1.2 показано поле простої групи із двох зарядів, що володіють однаковими по величині зарядами: а) різнойменними, б) однойменними.

Електричне поле називається рівномірним, якщо напруженість його у всіх точках однакова за величиною і напрямом. Рівномірне поле отримується між двома паралельними пластинами, розмірність яких значна (велика) у порівнянні із відстанню між ними рис. 1.3.

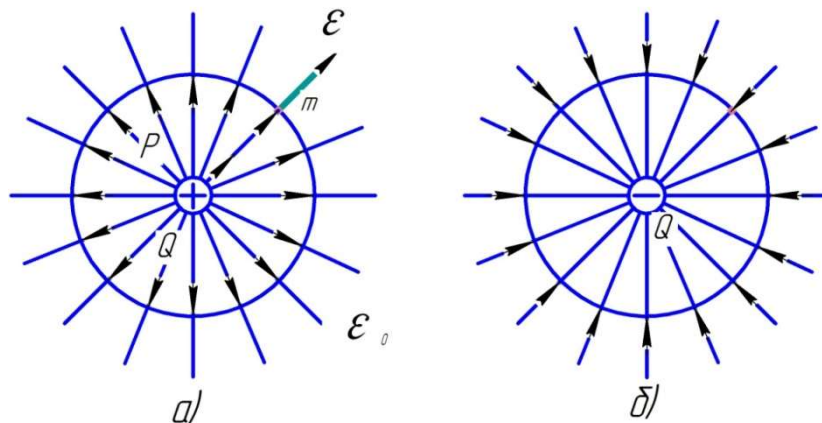


Рис. 1.1. Лінії напруженості електричного поля різнойменних точкових зарядів: а - позитивного, б - негативного.

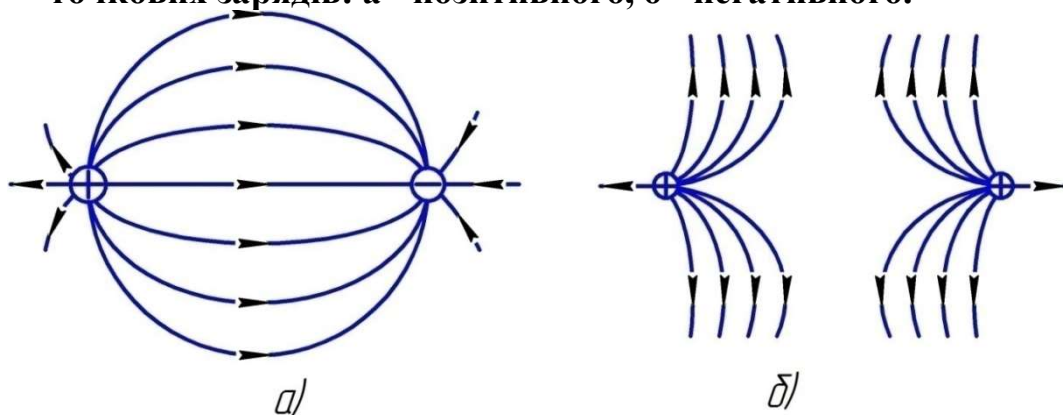


Рис. 1.2. Лінії напруженості електричного поля: а - двох однакових різнойменних, б - однойменних зарядів

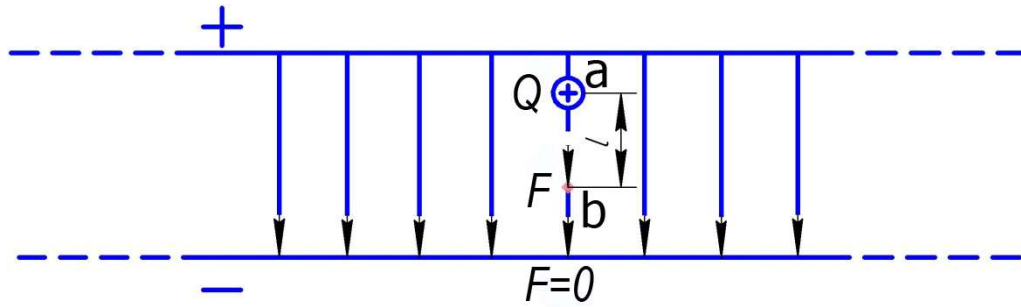


Рис. 1.3. Лінії напруженості рівномірного електричного поля

Прикладом практичного використання рівномірного електричного поля є пристрій із двох або більше нерухомих або рухомих пластин, розділених діелектриком, він називається конденсатором.

Конденсатори широко використовуються у силовій електротехніці, радіотехніці, електроніці, мікроелектроніці і т. ін. в якості накопичувача зарядів; ця властивість називається ємністю.

1.2.2. Потенціал електричного поля і електрична напруга

Якщо вільна частка з позитивним зарядом Q в рівномірному електричному полі рухається по шляху l з точки \mathbf{a} в точку \mathbf{b} (рис.1.3) під дією на неї сили F , то виконується робота A сили F на шляху l .

$$A = \int_a^b F dl = \int_a^b \mathcal{E} Q dl = Q \int_a^b \mathcal{E} dl. \quad (1.4)$$

Якщо розрахувати роботу, віднесену до одиничного заряду, то одержимо:

$$A_0 = \frac{A}{Q} = \int_a^b \mathcal{E} dl. \quad (1.5)$$

Для однорідного поля, в якому напруженість \mathcal{E} по шляху переміщень заряду вздовж силової лінії постійна за величиною і напрямом, робота:

$$A_0 = \int_a^b \mathcal{E} dl = \mathcal{E} \int_a^b dl = \mathcal{E} l. \quad (1.6)$$

Очевидно, що робота A_0 , що чиниться силами поля за рахунок енергії електричного поля; тому заряд переміщається із точки 1 в точку 2, в якій ця енергія менша. Якщо позначити потенціальну енергію заряду, a через φ_a , а потенціальну енергію заряду, в точці b через φ_b , то має місце наступна рівність:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_b = A_0 = \mathcal{E} l \\ \varphi_a - \varphi_b = U = \mathcal{E} l \end{aligned} \quad (1.7)$$

або

$$\mathcal{E} = \frac{U}{l}. \quad (1.8)$$

Величини φ_a і φ_b одержали назву електричних потенціалів, різниця цих величин називається різницею потенціалів або напругою між точками a і b , (U_{ab}).

Якщо у виразі $\varphi_a - \varphi_b$ припустити, що дорівнює φ_b рівним нулю ($\varphi_b = 0$) то можна одержати наступні визначення поняття потенціалу поля в даній точці.

Потенціал будь-якої точки електричного поля визначається роботою сил поля по переміщенню одиничного точкового позитивного заряду із даної точки поля в точку, потенціал якої вибраний рівним нулю, або потенціал будь-якої точки електричного поля чисельно дорівнює роботі, яку необхідно виконати проти сил поля під час переміщення в дану точку поля одиничного позитивного точкового заряду із точки, потенціал якої беремо рівним нулю.

У більшості випадків в процесі вивчення електричних явищ важливо знати не абсолютне значення потенціалу, а різницю потенціалів двох точок, так як цією різницею визначається робота сил поля під час переміщення електричних зарядів і величина електричного струму.

Під час протікання струму через зовнішні елементи кола електрична енергія перетворюється в інші види енергії і силами поля виконується робота по переносу електричних зарядів, яка, як уже відмічалось вище, характеризується електричною напругою.

Напруга – скалярна величина і виходячи з рівнянь (1.6 і 1.7) можна стверджувати, що вона дорівнює лінійному інтегралу напруженості електричного поля, а саме:

$$U = \int_l \mathcal{E} dl,$$

тобто напруга – це робота сили поля з напруженістю \mathcal{E} , яка витрачається на перенесення одиниці заряду в 1 Кл вздовж шляху l .

За позитивний напрямок напруги прийнято напрям, співпадаючий з вибраним позитивним напрямом струму.

Електричний потенціал і напруга вимірюються в системі одиниць СІ у вольтах.

$$[U] = \frac{[A]}{[Q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В(вольт)}.$$

Більш великою одиницею напруги є кількість кВ: $1\text{кВ} = 10^3 \text{В}$, а більш дрібними – мілівольт (мВ) і мікровольт (мкВ). $1\text{мВ} = 10^{-3}\text{В}$; $1\text{мкВ} = 10^{-6}\text{В}$.

1.3. Електричний струм

Електричним струмом називається спрямований рух електрично заряджених частинок (носіїв заряду). В залежності від взаємодії електричного струму із тими чи іншими речовинами ці речовини поділяються на провідники, діелектрики і напівпровідники.

Провідниками називають матеріали, які добре проводять електричний струм, діелектриками – це речовини, непровідні для струму, через це їх використовують як електроізоляційні матеріали. Напівпровідники займають проміжне положення між провідниками і діелектриками, їх провідність значною мірою залежить від наявності в них домішок.

Провідники поділяють на два види залежно від типу носіїв електричного заряду, що створюють електричний струм. У провідниках першого виду (метали та їх сплави) струм створюється вільними електронами, тому їх електропровідність називається **електронною**. У провідниках другого виду (зазвичай рідини: розчини солей, луг і кислот, які ще називаються електролітами) носіями електричного заряду є іони. В подальшому ми будемо розглядати тільки струм у провідниках.

Уявлення про електронну структуру атомів стало основою електронної теорії електричного струму. У цій теорії враховується, що валентні електрони (ті, що слабо зв'язані з ядром атома) починають спрямовано рухатися під дією електричного поля. Величина електричного струму визначається електричними зарядами усіх носіїв заряду, які проходять через площу поперечного перерізу провідника за одиницю часу і може бути виражена для любого моменту часу формулою

$$i = dQ/dt, \quad (1.9)$$

де i – миттєве значення струму;

dQ – кількість зарядів або електрики, що проходить через поперечний переріз провідника за інтервал часу dt .

Сила, що викликає рух електронів у провіднику (струм), розповсюджується зі швидкістю світла $3 \cdot 10^8$ км/с. Проте самі електрони рухаються у провіднику зі швидкостями порядку 1 мм/с.

Інтегруючи вираз (1.9), одержимо:

$$Q = \int idt.$$

Якщо рух зарядів відбувається рівномірно за проміжок часу t і за цей час через площу поперечного перерізу провідника проходить незмінна величина заряду Q , то струм у провіднику буде постійним і позначається великою літерою I латинського алфавіту:

$$Q = It,$$

$$\text{або } I = Q/t = Кл/с = Ампер [A]; (1A = \frac{1Кл}{1с}).$$

У міжнародній системі одиниць СІ одиницею кількості електрики Q є Кулон [Кл], а одиницею часу-секунда [с], отже, величина сили струму Ампер є Кулон/секунда.

На практиці застосовують також похідні від Ампера:

$$1 \text{ кілоампер (кА)} = 1000 \text{ А} = 1 \cdot 10^3 \text{ А};$$

$$1 \text{ міліампер (мА)} = 0.001 \text{ А} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$1 \text{ мікроампер (мкА)} = 0.000001 \text{ А} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ А};$$



Одиниця сили струму «ампер» отримала свою назву в 1891 році на честь французького фізика Ампера.

Ампер Андре Марі (22.01.1775 – 10.06.1836) – французький фізик, математик і хімік, член Паризької академії наук (1814). Його основні роботи з фізики присвячені електродинаміці.

В 1820 році сформулював правило для визначення напрямку дії магнітного поля струму на магнітну стрілку (правило Ампера), виконав велику кількість експериментів щодо дослідження взаємодії між електричним струмом і магнітом, виявив вплив магнітного поля Землі на провідники зі струмом, що рухаються. Відкрив взаємодію електричних струмів і встановив закон цієї взаємодії (закон Ампера), розробив теорію магнетизму (1820). Відкрив (1822) магнітний ефект котушки зі струмом – соленоїда, зробив висновок, що соленоїд, що обтікається струмом, є еквівалентом постійного магніту, висунув ідею підсилення магнітного поля шляхом розміщення всередині соленоїда залізного осердя із м'якого заліза. у 1820 році запропонував використовувати електромагнітні явища для передачі сигналів і т. ін. Наявність струму у провіднику можна виявити за тими ефектами, які він викликає. Три ефекти супроводжують електричний струм:

- в середовищі, що оточує провідник зі струмом, спостерігається магнітне поле;

- провідник, по якому протікає струм, нагрівається;

- в провідниках з іонною провідністю при проходженні електричного струму спостерігається перенесення речовини.

Позитивним напрямком електричного струму умовно вважають напрямок, в якому рухаються позитивно заряджені частинки – при іонній провідності. При електронній провідності (в металах) за позитивний приймається напрям струму, протилежний напрямку руху електронів.

Струм даної величини може проходити по провідниках різного перерізу; відношення величини струму I до площини поперечного перерізу

провідника S , по якому протікає струм, називається густиною струму і позначається літерою δ (дельта) грецького алфавіту:

$$\delta = \frac{I}{S}. \quad (1.10)$$

В системі СІ густина струму вимірюється в амперах на квадратний метр (A/m^2). На практиці частіше користуються більш зручною одиницею вимірювання ампер на квадратний міліметр (A/mm^2):

$$1 A / m^2 = 10^{-6} A / mm^2.$$

Від густини струму залежить температура нагрівання провідника, по якому протікає струм. Чим більша густина струму, тим більше струмове навантаження тим більше буде нагріватися провідник.

"Правила устроювання електроустановок" (ПУЕ) [7] передбачають допустиму економічну густину струму за нормальних умов експлуатації в A/mm^2 :

Неізольовані проводи і шини:

мідні – 2,5;

алюмінієві – 1,3.

Кабелі з паперовою і проводи з гумовою і полівінілхлоридною ізоляцією із жилами:

мідними – 3;

алюмінієвими – 1,6.

Кабелі з гумовою і пластмасовою ізоляцією із жилами:

мідними – 3,5;

алюмінієвими – 1,9.

Приклад 1.1. Лінію до штепсельної розетки виконано проводом з алюмінієвими жилами, площа поперечного перерізу якого $S_1 = 4 \text{ мм}^2$. Гнучкий шнур з мідними жилами, що з'єднує настільну лампу з розеткою, має переріз $S_2 = 2,5 \text{ мм}^2$. На якій ділянці густина струму буде більшою, та чому вона дорівнює, якщо величина струму у колі 1А?

Розв'язання. Для розв'язання задачі скористаємося формулою (1.10), підставивши в неї чисельні значення величин:

$$\delta_1 = I / S_1 = 1 / 4 = 0.25 A / \text{мм}^2;$$

$$\delta_2 = I / S_2 = 1 / 2,5 = 0.4 A / \text{мм}^2.$$

Таким чином, густина струму в шнурі буде в $0,4/0,25=1,6$ разів більшою, ніж у лінії.

За видом електричний струм поділяють на постійний і змінний (синусоїдальний, пилкоподібний, імпульсний, пульсуючий). Під постійним струмом розуміють електричний струм, що не змінюється в часі t . Всі інші струми, що змінюються в часі, будуть змінними. На рис. 1.4 приведені основні види струмів.

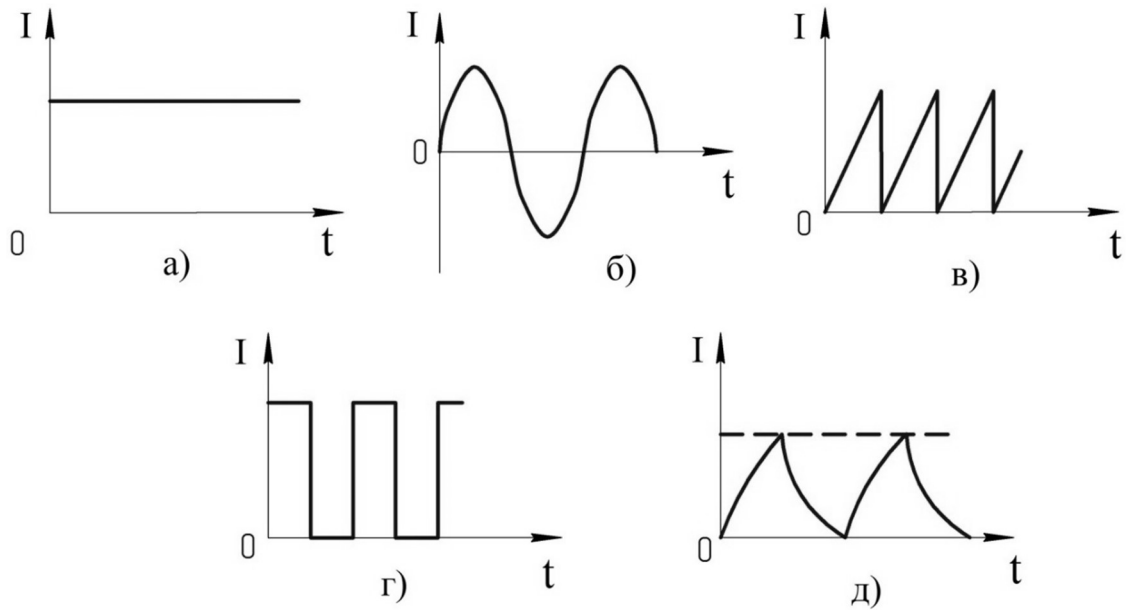


Рис. 1.4. Види струмів:
 а) – постійний струм; б) – синусоїдальний; в) - пилоподібний;
 г) – прямокутний; д) - пульсуючий

1.4. Закон Ома. Електричний опір.

Встановимо тепер залежність між струмом в провіднику і напругою на його кінцях (затискачах).

Кількісне співвідношення між напруженістю електричного поля, що призводить спрямованого руху зарядів і густиною струму, за незмінної температури, для кожного провідника густина струму пропорційна напруженості поля:

$$\delta = \gamma \mathcal{E}, \quad (1.11)$$

де коефіцієнт пропорційності γ називається питомою провідністю даної речовини (матеріалу провідника) і характеризує здатність провідника пропускати електричний струм.

Так як в однорідному полі $\mathcal{E} = U/l$ (1.18), то:

$$\delta = \gamma \frac{U}{l}.$$

Перемножуючи обидві частини останнього рівняння на площу поперечного перерізу провідника S , одержимо $\delta S = \frac{\gamma S}{l} \cdot U$, враховуючи, що

$\delta = \frac{I}{S}$ (1.10). Остаточно маємо:

$$I = \frac{\gamma S}{l} \cdot U = GU, \quad (1.12)$$

де $G = \frac{\gamma S}{l}$ – величина, що залежить від матеріалу провідника, його довжини і поперечного перерізу та називається провідністю; за незмінної температури провідність даного провідника постійна.

Рівняння (1.12) було отримано дослідним шляхом у 1826 році – це один із основних законів електротехніки – закон Ома для ділянки електричного кола. Згідно з законом Ома струм у провіднику прямо пропорційний напрузі між його кінцями.

Як ми вже згадували, у всіх елементах електричного кола відбувається перетворення енергії, тобто елементи кола володіють опором спрямованому руху носієм заряду. З кількісної сторони це явище характеризує величина зворотна провідності, яка так і називається – опором і позначається буквою R.

Таким чином,

$$R = \frac{1}{G} = \frac{l}{\gamma S} \quad (1.13)$$

$$I = GU = \frac{U}{R}, \quad (1.14)$$

$$\text{або } U = IR. \quad (1.15)$$

Закон Ома встановлює лінійну залежність між напругою і струмом. Коефіцієнт пропорційності між напругою на кінцях, як провідника і струму, що проходить через нього визначається питомою провідністю матеріалу і геометричними розмірами провідника.

Записавши закон Ома у формі $R = \frac{U}{I}$, встановимо одиницю вимірювання опору:

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{1B}{1A} = 1 \text{ Ом.}$$

Опором в 1 Ом володіє провідник, в якому встановлюється струм в 1А за напругою в 1В.

На практиці при вимірюванні опорів користуються більш великими одиницями – кілоом (кОм) і мегом (МОм):

$$1\text{кОм} = 10^3 \text{ Ом};$$

$$1\text{МОм} = 10^6 \text{ Ом.}$$

Одиниця вимірювання провідності зворотна Ом, тобто

$$[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{Сіменс (См)}.$$

Величину, зворотну питомій провідності, називають питомим опором і позначають буквою ρ (Ро):

$$\rho = \frac{1}{\gamma}.$$

**У 1881 році на електротехнічному з'їзді у Парижі вчені одноголосно затвердили назву одиниці опору 1 Ом. Цей факт – данина поваги колег, міжнародне визнання заслуг вченого.*

За рівнянням (1.13) опір $R = \frac{l}{\gamma S}$. Замінивши γ , будемо мати :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.16)$$

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

У міжнародній системі одиниць СІ довжина вимірюється в метрах. Отже, одиницею вимірювання питомого опору буде:

$$[\rho] = \left[\frac{RS}{l} \right] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Однак питомий опір виміряний в Ом для провідникових металів, виражається дуже малими числами; окрім того, під час практичних розрахунків зручніше поперечний переріз провідника виражати не в квадратних метрах, а в квадратних міліметрах. Через це під питомим опором розуміють часто величину, чисельно рівну опору провідника довжиною 1 м за поперечним перерізом 1 мм² і температурі 20°C.

В цьому випадку питомий опір вимірюється в Ом·мм²/м, а питома провідність – в м/Ом·мм², при цьому 1 Ом·м = 10⁶ Ом·мм²/м.

Значення питомих опорів і деяких характеристик провідникових матеріалів приведені в додатку 1, таблиця Д 1.1.

Порівняно малим питомим опором володіють метали – провідники: срібло, золото, мідь, алюміній

Опір діелектриків величезний у порівнянні з опором провідників. Питомий опір діелектриків вимірюють зазвичай в Ом·см, причому 1 Ом·м = 100 Ом·см.

Метали з малим питомим опором (мідь, алюміній) широко використовуються в провідникових і кабельних виробках, для виготовлення обмоток катушок, електричних машин, трансформаторів тощо.

Для виготовлення обмоток нагрівальних пристроїв, приладів, реостатів застосовуються сплави з великим питомим опором (ніхром, фехраль, вольфрам та інші). Із формули (1.16) випливає, що за даним опором довжина проводу $l = \frac{RS}{\rho}$, через це необхідний для обмотки провід з

опором R виходить коротше, ніж більше ρ . Більш короткий провідник простіше розташувати в нагрівальному приладі (пристрої).

Елемент реального електричного кола, призначений для споживання електричної енергії, або для обмеження струму в колі, називається резистором. Резистор (від латинського слова *resisto* – опираюся) має притаманний йому опір в омах. Умовне позначення резистора на електротехнічних схемах позначено на рис. 1.5.

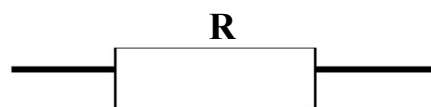


Рис. 1.5. Резистор з опором R

Закон Ома в диференціальній формі.

Закон Ома для однорідної ділянки кола, всі точки якого мають однакову температуру, [див. (1.7;1.8)] виражається формулою:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}.$$

У такому вигляді формула закону Ома справедлива тільки для провідників кінцевої довжини, так як величини, що входять в цей вираз I та U вимірюються приладами, увімкненими на цій ділянці.

Опір R ділянки кола залежить від довжини l цієї ділянки, поперечного перерізу S і питомого опору ρ . Залежність опору від матеріалу провідника і його геометричних розмірів визначається формулою (1.16), яка справедлива тільки для провідників постійного перерізу. Для провідників змінного перерізу відповідна формула буде більш складною. У провіднику зі змінним перерізом сила струму в різних перерізах буде однаковою, однак густина струму буде різною не тільки в різних перерізах, але навіть і в різних точках одного й того ж перерізу. Різні значення буде мати і напруженість, а отже, і різниця потенціалів на кінцях різних елементарних ділянок. Усередині значення U , I та R по всьому об'єму провідника не дають інформації про електричні властивості провідника в кожній його точці.

Для успішного вивчення електричних кіл необхідно одержати вираз закону Ома у диференціальній формі з тим, щоб він виконувався в будь-якій точці провідника будь-якої форми і будь-яких розмірів.

Знаючи зв'язок напруженості електричного поля з різницею потенціалів на кінцях деякої ділянки $\mathcal{E} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{l}$, залежність опору провідника від його розмірів і матеріалу та, використовуючи закон Ома, для однорідної ділянки кола в інтегральній формі $I = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}$, маємо $\varphi_a - \varphi_b = \mathcal{E}l$ і $\varphi_a - \varphi_b = IR = I\rho l / S$.

Порівнявши ці два рівняння знайдемо:

$$\mathcal{E}l = \frac{I\rho l}{S} \text{ або } \frac{I}{S} = \frac{\mathcal{E}}{\rho}; \rho = \gamma\mathcal{E},$$

де $\frac{1}{\rho} = \gamma$ – питома провідність матеріалу, з якого зроблений провідник;

$$\frac{I}{S} = \delta \text{ – густина струму.}$$

Густина струму – це вектор, напрям якого співпадає з напрямом вектора швидкості переміщення позитивних зарядів. Отриманий вираз у векторній формі буде мати вигляд:

$$\vec{\delta} = \gamma \vec{\mathcal{E}}.$$

Воно виконується будь-якій точці провідника, по якому тече струм. Для замкнутого кола слід врахувати той факт, що в колі, крім напруженості поля кулонівських сил $\mathcal{E}_{кл}$, діють також сторонні сили, які утворюють поле сторонніх сил, яке характеризується напруженістю $\mathcal{E}_{ст}$. З урахуванням цього, закон Ома для замкнутого кола в диференціальній формі буде мати вигляд:

$$\vec{\delta} = \gamma(\mathcal{E}_{кл} + \mathcal{E}_{ст}).$$

У такому вигляді закон Ома входить в систему рівнянь Максвелла, що фундаментальний для класичної електродинаміки.



Ом Георг Сімон (16.03.1787 – 6.07.1854)

– німецький фізик, член-кореспондент Берлінської академії наук (1839). Закінчив Ерлангенський університет (1811). Був викладачем математики, а потім фізики. З 1833 – професор Нюрнберзької вищої політехнічної школи, потім ректор Мюнхенського університету (1849-1852).

Займався дослідженнями в галузі електрики, акустики, оптики тощо. Експериментально відкрив в 1826 році основний закон електричного кола, що з'єднає між собою основні електричні величини струм, опір і напругу (закон Ома). У травні 1827 року у Німеччині в м. Берлін у видавництві Рімана була опублікована монографія Г. Ома «Теоретичні дослідження електричних кіл» об'ємом 245 сторінок, в якій він вивів закон теоретично (для ділянки кола і повного кола), ввів у практику поняття «електрорушійної сили», «спаду напруги» і «провідності». Виконав (1830) перші вимірювання електрорушійної сили джерела струму. В 1842 році став членом Лондонського королівського товариства.

Залежність електричного опору від температури

При підвищенні температури провідника посилюється тепловий хаотичний рух частинок, що збільшує кількість зіткнень і ускладнює упорядкований рух електронів. Цим пояснюється збільшення питомого електричного опору металів із зростанням температури.

Умовно можна вважати, що майже у всіх металах при робочих температурах питомий опір із зростанням температури збільшується за лінійним законом:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)], \quad (1.17)$$

де ρ_2 і ρ_1 – питомий опір при кінцевій та початковій температурах відповідно;

α – сталий для цього металу коефіцієнт, який називається температурним коефіцієнтом опору, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

θ_1 і θ_2 – початкова та кінцева температури відповідно.

Питомі опори при $t = 20^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнти α для різних провідникових матеріалів наведено в додатку 1 таблиця Д 1.1

В першому наближенні в межах невеликих змін температур (від 0 до 100°C) опір провідників залежно від температури виражається формулою:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]. \quad (1.18)$$

Приклад 1.2. Визначити опір мідного проводу двопровідної лінії передачі при $\theta_1 = 20^{\circ}\text{C}$ і 30°C , якщо переріз проводу $S = 120 \text{ мм}^2$, а довжина лінії $L = 200 \text{ км}$.

Розв'язання. З додатка 1 таблиці Д1.1 питомий опір міді при $\theta_1 = 20^{\circ}\text{C}$ $\rho = 0.0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$; температурний коефіцієнт опору $\alpha = 0.004 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$. Визначимо опір проводу при $\theta_1 = 20^{\circ}\text{C}$ за формулою (1.16), врахувавши довжину прямого й зворотного проводів лінії:

$$R_1 = 0.0175 \cdot 200000 \cdot 2/120 = 58,3 \text{ Ом}$$

Опір проводу при $\theta_2 = 30^{\circ}\text{C}$ дорівнює:

$$R_2 = 58.3 [1 + 0.004(30 - 20)] = 60.6 \text{ Ом}$$

Приклад 1.3. Визначити температуру мідної обмотки електродвигуна, якщо її опір до початку роботи при температурі 20°C дорівнював $R_1 = 0,02 \text{ Ом}$, а в процесі роботи опір обмотки змінився до величини $R_2 = 0,0236 \text{ Ом}$. Температурний коефіцієнт міді $\alpha = 0,004 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Розв'язання. Із формули (1.17)

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1 \cdot \alpha} = \frac{0.0236 - 0.02}{0.02} \cdot \frac{1}{0.004} ^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C}$$

Звідси:

$$\theta_2 = \theta_1 + 45^{\circ} = 20^{\circ} + 45^{\circ} = 65^{\circ}.$$

1.5. Електричні кола

Явище електричного струму має величезне практичне значення. З ним пов'язані найважливіші енергетичні перетворення: добування електричної енергії з інших видів енергії та перетворення електричної енергії в механічну. Ці енергетичні перетворення здійснюються в електричних колах.

Електричне коло – це сукупність пристроїв і об'єктів, які утворюють шлях для проходження електричного струму. Електричні кола класифікують за видом струму: кола постійного і змінного струму; за складом елементів: кола активні та пасивні, кола лінійні та нелінійні; за характером розподілу параметрів: кола із зосередженими та розподіленими параметрами. Найпростіше електричне коло (рис.1.6) складається з трьох основних елементів: джерела електричної енергії, навантаження або приймачів електричної енергії, з'єднувальних струмоведучих проводів.

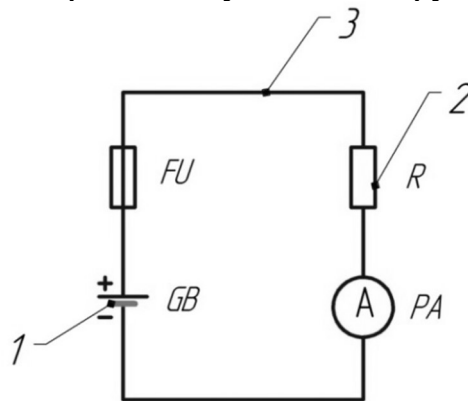


Рис. 1.6. Найпростіше електричне коло:

**1 – джерело електричної енергії; 2 – приймач електричної енергії;
3 – з'єднувальні струмоведучі проводи**

Крім основних елементів, до складу електричних кіл входять різні допоміжні елементи для керування, захисту, регулювання, контролю, тощо. Допоміжні елементи, як і основні, вмикаються в коло за допомогою з'єднувальних струмоведучих проводів (наприклад, запобіжник – FU, амперметр – PA).

1.5.1. Схеми електричних кіл

Під час розробки, конструювання, монтажу електричних виробів і установок обов'язково розробляють електричні схеми. Схема електричного кола – це графічне зображення електричного кола, що містить умовні графічні позначення його основних і допоміжних елементів і показує з'єднання цих елементів. Залежно від основного призначення найчастіше користуються трьома основними видами схем: монтажними, принциповими і заміщення.

На монтажних схемах зображують рисунок (ескіз) елементів кола, їх розташування на плані, з'єднувальні провідники. В більшості випадків монтажними схемами користуються при виготовленні та первинному монтажу електрообладнання, а також при ремонті – в процесі експлуатації.

На принципових схемах показують умовні графічні позначення елементів (рис.1.7, а)* і схему їх з'єднань, ними користуються при вивченні, монтажі та ремонті електричних кіл і пристроїв.

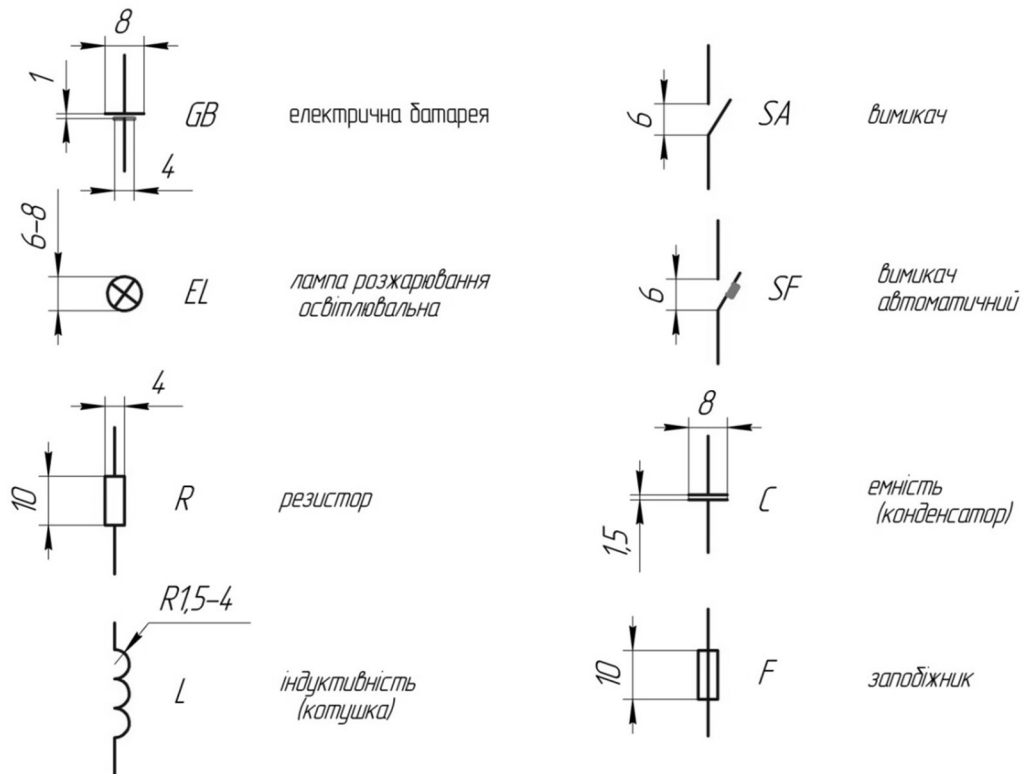


Рис. (1.7, а) Основні умовні графічні позначення елементів електричних схем

*Умовні графічні позначення елементів і електричних пристроїв наведені в додатку 1. Таблиця Д.1.2.

Приклад електричної принципової схеми наведено на рис.1.7, б.

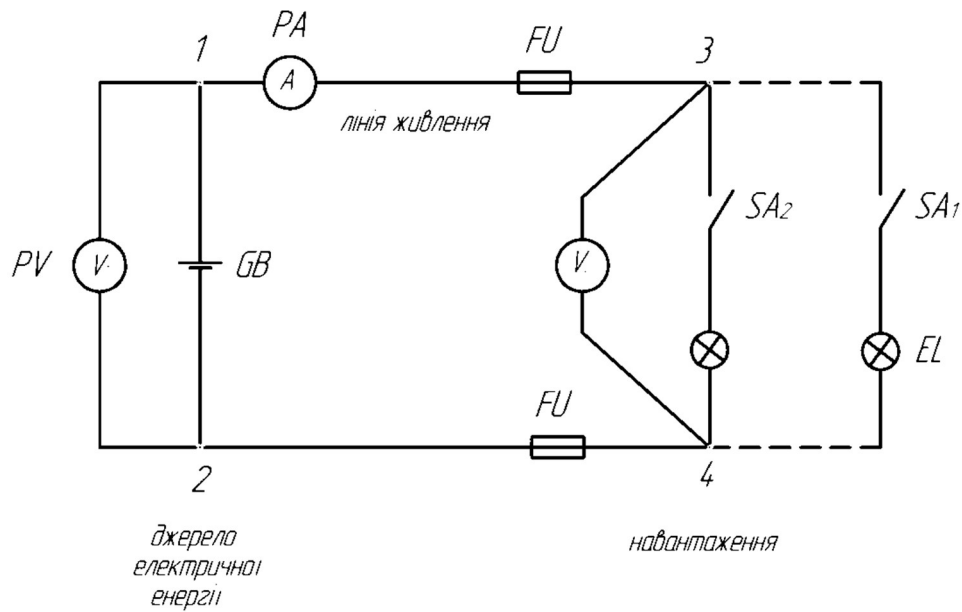


Рис. (1.7, б) Схема електрична принципова

Схема заміщення – це розрахункова модель електричного кола (рис.1.7, в). На ній реальні елементи заміщуються розрахунковими моделями (ідеалізованими елементами) і із схеми виключаються всі допоміжні елементи, які не впливають на результати розрахунків. Схеми заміщення використовуються при розрахунках електричних кіл.

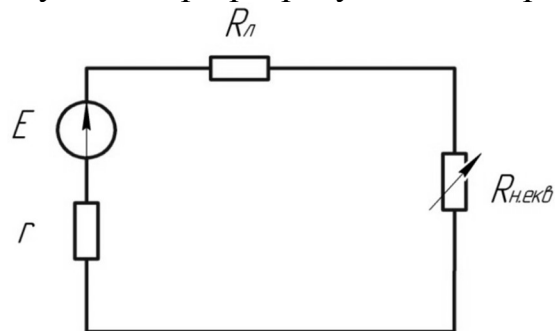


Рис. (1.7, в) Схема заміщення схеми, зображеної на Рис. 1.7, б)

Складні розгалужені схеми характеризуються електричними вітками, вузлами і контурами (рис.1.7, г).

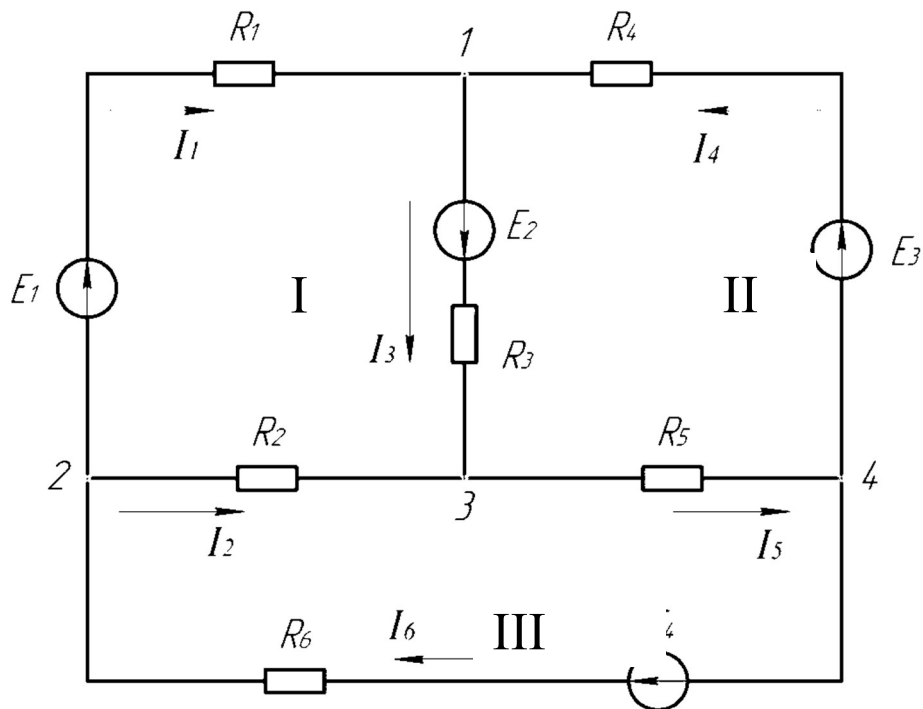


Рис. (1.7, г) Складна розгалужена схема електричного кола, що утримує чотири джерела живлення, чотири вузли, шість віток і три незалежних контури

Вітка – це частина електричної схеми між двома вузлами, вздовж якої струм не змінюється. Кількість віток в схемі відповідає кількості незалежних струмів, всі елементи у вітці з’єднані послідовно. Кількість віток у схемі (електричному колі) позначається літерою p (пе) латинського алфавіту.

Вузол – це точка електричного кола (схеми), яка складається із трьох або більше віток; кількість вузлів в схемі позначаються літерою q (кю).

Замкнений контур – це замкнений шлях для проходження електричного струму в електричній схемі. Кількість незалежних замкнених контурів в електричних колах (схемах) позначаються літерою n (ен). Незалежним вважається контур, який включає в себе хоча б одну вітку, яка не увійшла в інші контури (рис.1.6, г – контури I, II, III).

Для будь-якого електричного кола кількість незалежних контурів визначається виразом:

$$n = p - (q - 1).$$

1.6. Електрорушійна сила

Для практичного використання електричної енергії необхідно тривалий час підтримувати електричний струм в електричних колах і електроустановках. Електричний струм може тривалий час підтримуватися

в замкненому провідному контурі – електричному колі, в якому діє електрорушійна сила (ЕРС).

Електрорушійні сили виникають в пристроях, що називаються **джерелами** електричної енергії. Принцип дії джерела електричної енергії має різноманітний характер залежно від того, який вид енергії неелектричного походження перетворюється в електричну. Ця дія пов'язана з наявністю електричного поля, яке утворюється сторонніми силами неелектричного походження. Робота A в джоулях (Дж), чинена цими полями під час перенесення одиниці заряду Q (1кулон – 1Кл), чисельно дорівнює ЕРС. Із цього визначення отримуємо одиницю ЕРС:

$$[E] = \frac{[A]}{[Q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В(вольт)}^*.$$

Миттєве значення ЕРС, що змінюється в часі (в колах змінного струму) в електричних схемах позначається через малу літеру e , а постійна по величині ЕРС через велику літеру E . Умовне позначення ЕРС на схемах заміщення має вигляд:

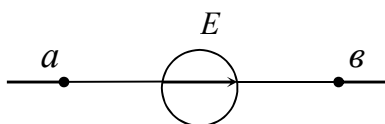


Рис. 1.8. Позначення електрорушійної сили в електричних схемах

Внутрішній опір джерела, в більшості випадків, приймається рівним нулю.

Таким чином, будь-який замкнений провідний контур, в якому протікає струм, утримує активне джерело електричної енергії з електрорушійною силою E .



Вольта **Алессандро** (18.02.1745 – 05.03.1827) італійський фізик, хімік і фізіолог, винахідник джерела постійного електричного струму. В юності захоплювався природознавчими науками, вчився в школі ордена єзуїтів. В 1774-1779 викладав фізику в гімназії м. Комо. З 1779 року – професор Павійського університету, в 1815-1819 – директор філософського факультету Падуанського університету.

* На I Міжнародному конгресі електриків в Парижі (в 1881 р. на честь італійського фізика-фізіолога А. Вольта) одиниці електричного потенціалу, електрорушійної сили і електричної напруги названо «вольт».

Його фізичні дослідження в галузі електрики. Зацікавившись дослідями Л. Гальвані з «тваринною» електрикою, в 1792 р. почав їх повторювати і швидко дійшов до висновку, що причиною виникнення короткочасного струму в м'язах жаб є не властива їм «тваринна» електрика, як це вважав Гальвані, а наявність кола із провідників двох класів (двох різнорідних металів і рідини). Після довготривалих дослідів для підсилення ефектів, що виникають при з'єднанні декількох різнорідних провідників, сконструював в кінці 1799 року перше джерело довготривалого гальванічного (електричного) струму – вольтів стовб.

В 1801 році в Парижі відбулася яскрава подія, що була неодноразово описана істориками: в присутності Наполеона Бонапарта відбулося представлення наукової роботи «Штучний електричний орган, що імітує натуральний електричний орган вугра або ската з демонстрацією моделі цього органу».

Зауважимо, що електричні властивості деяких видів риб, відомі ще з давніх часів, дотепер є невідгаданою таємницею природи. Так, наприклад, в 1960 році на виставці, що була організована англійським Науковим королівським товариством до 300-річчя його заснування, серед таємниць природи, в майбутньому повинні бути відкритими людству, демонструвався звичайний скляний акваріум, в якому знаходилась риба – електричний скат. До акваріуму через металеві електроди був підключений вольтметр. Коли риба була спокійною, стрілка вольтметра стояла на нулі. Коли риба рухалася вольтметр показував напругу, яка досягала рівня 400 В – при активному русі. На підписі було зазначено: «Природу цього електричного явища, яке спостерігалось задовго до організації англійського королівського товариства, людина розгадати до цього часу не може».

Отже, ще тоді в 1801 році, Наполеон щедро нагородив автора: на честь вченого була викарбована медаль і заснована премія 80000 екю. Всі провідні наукові товариства того часу, відкривали перед ним свої двері, а найкращі університети Європи були готові надати йому свої кафедри.

Ім'я цієї людини – Алессандро Вольта, і демонстрував він тоді винахід – вольтів стовп, прообраз усіх сучасних батарей і акумуляторів.

За допомогою вольтового стовпа Вольта демонстрував Наполеону демонстрував оживлення відрізаних частин різних тварин. На той час це була надзвичайна сенсація.

Електрорушійна сила виникає в джерелі і за відсутності струму в колі (коли, наприклад, коло розімкнуте). Як за замкненим, так і за розімкненим колом ЕРС безперервно підтримує різницю потенціалів на затискачах джерела електричної енергії. Чисельно ЕРС E дорівнює різниці потенціалів на затискачах джерела a і b за розімкненим електричним колом, тобто при відсутності струму в джерелі:

$$E = \varphi_a - \varphi_e, \quad (1.19)$$

де $\varphi_a > \varphi_e$.

Затискувач джерела, потенціал якого вище, позначається знаком плюс «+», а другий затискувач знаком мінус «-».

Електрорушійна сила джерела має напрямок від затискувача з меншим потенціалом «+» до затискувача з більшим потенціалом «-».

1.7. Закони Кірхгофа для розгалужених електричних кіл

Розгалужені кола неможливо аналізувати і розраховувати тільки за допомогою закону Ома. Необхідно користуватися ще двома законами – Кірхгофа. Ці закони дозволяють розраховувати електричне коло будь-якої конфігурації і складності, тобто є одними із основних законів електротехніки. Вони використовуються не тільки для розрахунків кіл постійного струму, а й для розрахунків кіл змінного струму та магнітних кіл.



Густав Роберт Кірхгоф (12.03.1824 – 17.10.1887) – німецький фізик, член Берлінської академії наук (1875). Народився в Кенігсберзі. Закінчив Кенігсбернський університет (1846), був професором Бреславського і Гейдельбертського університетів. У 1845 р. будучи на той час студентом Університету, запропонував математичні співвідношення між струмами – у вузлах схеми, а також напругами й ЕРС – в контурах схеми, які сьогодні мають назву першого та другого законів Кірхгофа. (На той час Р. Кірхгофу було 23 роки). В 1857 р. побудував загальну теорію руху струму в провідниках. У 1859 р. розробив метод спектрального аналізу і відкрив нові елементи – цезій і рубідій, встановив один із основних законів теплового випромінювання, згідно з яким відношення емісійної здатності тіла до поглинальної не залежить від природи випромінюючого тіла (Закон Кірхгофа). Вперше висловив припущення, що Сонце складається із розжареної рідкої маси, що оточене атмосферою пару.

Перший закон Кірхгофа встановлює, що алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться в вузлі електричного кола, дорівнює нулю.

В найбільш загальній формі перший закон Кірхгофа математично можна записати так:

$$\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} = 0. \quad (1.20)$$

Згідно з принципом неперервності електричного струму для електричних кіл постійного струму перший закон Кірхгофа можна сформулювати ще й так: сума всіх струмів, що приходять до вузла, дорівнює сумі всіх струмів, що відходять від вузла.

З такого формулювання першого закону Кірхгофа постає правило:

всі струми, що приходять до вузла, рахуються додатними і вводяться в формулу першого закону Кірхгофа зі знаком плюс; всі струми, що відходять від вузла, слід рахувати від'ємними і вводити в формулу зі знаком мінус (або навпаки).

Для ілюстрації першого закону Кірхгофа розглянемо вузол, показаний на (рис. 1.8) (такі вузли в схемах іноді називають вузлами Кірхгофа). Рівняння першого закону Кірхгофа для цього вузла може бути написано в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 - I_4 &= 0 \\ I_1 + I_2 &= I_3 + I_4 \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

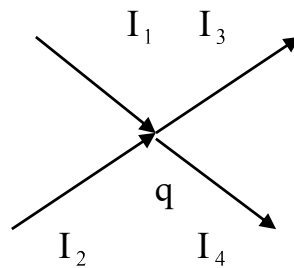


Рис. 1.9. Спрямування струмів у вузлі

Для вузла с (рис. 1.9) за першим законом Кірхгофа:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0 \text{ або } I = I_3 + I_4 + I_5.$$

Як видно із цих рівнянь, струм, що підходить до вузла, дорівнює сумі струмів, що відходять від вузла.

Другий закон Кірхгофа доводить, що в будь-якому замкненому електричному контурі, довільно виділеному в складному розгалуженому колі, алгебраїчна сума всіх спадів напруг із врахуванням вибраних напрямків струмів) на окремих ділянках контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n I \cdot R_k = \sum_{k=1}^n E_k \quad (1.22)$$

Рис. 1.10. Найпростіший замкнений контур

Для застосування до найпростішого замкненого контура (рис.1.9), тобто для послідовного з'єднання елементів кола, на всіх ділянках якого струм один і той же, рівняння за другим законом Кірхгофа запишеться

наступним чином: (обхід контура виконується за напрямком руху годинникової стрілки) як: $E_1 + E_2 - E_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3$, або в загальній

формі буде: $I \sum_{k=1}^3 R_k = \sum_{k=1}^3 E_k$.

1.8. Енергія в електричному колі



Термін «енергія» в сьогодишньому розумінні цього слова вперше став використовувати Уільям Томсон.

Уільям Томсон (Кельвін) (26.06.1824-17.12.1907) – англійський фізик, один із засновників термодинаміки, член Лондонського королівського товариства. У 1892 році одержав титул лорда Кельвіна. Закінчив Кембриджський університет (1845). 1846-1899рр. – професор університету в Глазго. Член багатьох академій наук і наукових товариств. Його наукові роботи належать до термодинаміки, гідродинаміки, електромагнетизму, теплофізики, математики, техніки. У 1851 році

сформулював другий початок термодинаміки: теплота сама по собі не може переходити від холодного тіла до теплого. Виходячи з цього закону, застосовуючи його до Всесвіту в цілому, прийшов 1852 до помилкового висновку про неминучу «теплову смерть Всесвіту» (гіпотеза теплової смерті Всесвіту). Неправомірність такого підходу і помилковість гіпотези доказав Л. Больцман – австрійський фізик-теоретик. Томсон відкрив в 1856 році третій термодинамічний ефект: якщо вздовж провідника, по якому протікає електричний струм, існує перепад температур, то окрім Джоулевої теплоти, в об'ємі провідника в залежності від напрямку струму виділяється або поглинається ще деяка кількість теплоти (теплота Томсона). Побудував термодинамічну теорію термоелектричних явищ і багато іншого.

Електрична енергія – річ дуже корисна, але сказати, де вона знаходиться, не так уже і просто. Через це, коли вас питають про це, за нашою думкою, краще всього відповісти – навколо провідника, в електромагнітному полі, що супроводжує струм.

Джерело електричної енергії – це перетворювач будь-якого виду неелектричної енергії в електричну. Основним видом такого перетворювача є електромеханічний генератор – перетворювач механічної енергії на електричну.

Для кіл постійного струму застосовуються електромеханічні генератори постійного струму; перетворювачі хімічної енергії на електричну – гальванічні елементи та акумулятори.

В сучасному світі кожна освічена людина використовує в своїй практичній діяльності малопотужні гальванічні елементи та акумулятори.

Водночас не всім відомо, що вік цих джерел оцінюється в понад 2 тисячі років. Вони були знайдені на території розкопок прадавньої Месопотамії (сучасна територія Іраку). Знахідки - це глиняні посудини з мідними стержнями всередині. Вчені вважають, що у судинах утримувалась якась рідина, яка у взаємодії з міддю утворювала електричний струм, якщо це так, то ця знахідка – найперший відомий перетворювач хімічної енергії в електричну.

У деяких випадках джерелами електричної енергії можна вважати також електричні трансформатори і випрямлячі. Ці пристрої не виробляють електричну енергію. Трансформатори підключаються до ліній електропостачання і змінюють значення величини, що перетворюється (напруга, струм), а випрямлячі перетворюють змінну напругу на сталу. Трансформатори і випрямлячі, з одного боку, є приймачами електричної енергії, а з другого, – джерелами.

У замкненому електричному колі відбувається обмін енергією. При цьому необхідно розрізнити два процеси: одержання електричної енергії (в джерелі ЕРС) і її перетворення в інші види (на ділянках кола, де є навантаження або спад напруги).

На ділянці кола, де носії зарядів отримують енергію від сторонніх сил неелектричного походження, утворюється електрорушійна сила E , яку можна визначити за формулою:

$$E = \frac{W_1}{Q}, \quad (1.23)$$

де W_1 – енергія, отримана зарядами Q .

Такі джерела електричної енергії називаються джерелами ЕРС.

На ділянці електричного кола, де заряди віддають енергію споживачам, має місце явище, що називається спадом напруги (U):

$$U = \frac{W_2}{Q}, \quad (1.24)$$

де W_2 – енергія, що віддається зарядами Q в навантаженні при перетворенні електричної енергії в інший вид;

U – спад напруги на ділянках кола прийнято називати просто **напругою**.

Таким чином із рівнянь (1.23, 1.24) випливає, що: одержана від джерела енергія $W_1 = E \cdot Q$; віддана споживачу енергія $W_2 = U \cdot Q$;

Якщо в останнє рівняння підставити значення заряду Q , за формулою (1.1) $dQ = I \cdot dt$, то для приросту (диференціала) відданої за інтервал часу dt енергії отримаємо наступне рівняння:

$$dW_2 = UI dt.$$

Після інтегрування за часом знаходимо енергію, отриману електричним навантаженням (споживачем):

$$W_2 = \int UI dt. \quad (1.25)$$

Якщо U і I не залежать від часу (що має місце у колах постійного струму), то

$$W_2 = UI \cdot t. \quad (1.26)$$

Беручи до уваги закон Ома, можна скласти вираз для енергії електричного струму, що перетворюється в приймачі із опором R в енергію теплову:

$$W_2 = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (1.27)$$

Одиниця енергії:

$$W_2 = UI t = 1B \cdot A \cdot c = 1Bm \cdot c \quad (1 \text{ ват-секунда}) = 1 \text{ Дж} \quad (1 \text{ джоуль})$$

Енергія іноді виражається в кіловат-годинах.

$$(1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3.6 \cdot 10^3 \text{ Дж})$$

В міжнародній системі одиниць СІ,

$$1Bm \cdot c = 1H \cdot m \quad (\text{ньютонометр})$$

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

1.8.1. Потужність

Потужність позначається символом P (велика буква латинського алфавіту – "пе") і визначається як зміна енергії в одиницю часу. Згідно з цим визначенням:

$$P = dW / dt. \quad (1.28)$$

За рівнянням (1.26) потужність у колі постійного струму:

$$P = UI. \quad (1.29)$$

Якщо ввести в це рівняння значення опору R , за законом Ома, одержимо такі вирази для потужності електричного струму:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (1.30)$$

Потужність вимірюється приладом ватметром, а одиниця вимірювання буде:

$$P = UI = 1B \cdot 1A = 1BA = 1Bm \quad (1 \text{ ват}).$$

Ват – потужність, при якій за 1с здійснюється робота в 1 Джоуль.

В електроенергетиці, як правило, використовуються більші одиниці потужності: кіловат (кВт) і мегават (МВт), причому $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$ і 1 МВт

$= 10^6 \text{ Вт}$, а в слабкопотужковій і вимірювальній техніці – міліват (мВт), причому $1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$.

Потужність являється найважливішою характеристикою електричних машин і установок, оскільки для практики важлива їх спроможність виконувати роботу в одиницю часу.

Приклад 1.4. Лампа розжарювання, опір вольфрамової спіралі в стані горіння дорівнює 800 Ом , ввімкнута в мережу напругою 220 В .

Визначити:

- а) струм, що протікає через лампу;
- б) потужність, що споживає лампа;
- в) вартість енергії, одержаної від мережі протягом 10 годин, якщо $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ коштує 16 коп.

Розв'язання:

а) Згідно рівняння (1.6), маємо $I = \frac{U}{R} = \frac{220}{800} = 0,275 \text{ А}$;

б) За рівнянням (1.28) потужність, $P = \frac{U^2}{R} = \frac{(220)^2}{800} = 60,5 \text{ Вт} \approx 60 \text{ Вт}$ або

$$P = I^2 R = 0,275^2 \cdot 800 = 60,5 \text{ Вт} \approx 60 \text{ Вт}$$

Результат аналогічний.

Таким чином, в мережу ввімкнена лампа потужністю 60 Вт .

в) При умові постійного значення потужності в часі (постійний струм) із рівняння (1.26) одержимо

$$W = P \cdot t = 60 \cdot 10 = 600 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 0,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \text{ а відповідно вартість складає } 16 \cdot 0,6 = 9,6 \text{ коп.}$$

Приклад 1.5. Опір електричної лампи з номінальними параметрами 60 Вт і 220 В при температурі 293° К (тобто в холодному стані) дорівнює 62 Ом .

Знайти температуру розжареної вольфрамової спіралі при номінальній напрузі, прийнявши температурний коефіцієнт $\alpha_T = 5 \cdot 10^3 \text{ } 1/\text{К}$ у всьому діапазоні температур.

Розв'язання:

Опір спіралі в розжареному стані визначається за її номінальними параметрами

$$R_2 = \frac{U^2}{P} = \frac{(220)^2}{60} = 807 \text{ Ом.}$$

За відомим опором розжареної спіралі за виразом (1.18) можна визначити її нагрівання.

$$\Delta T = (R_2 - R_1) / R_1 \alpha_T = (807 - 62) / 62 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K} = 2403 \text{ K}$$

і температуру $T_2 = T_1 + \Delta T = 2403 + 293 = 2696 \text{ K}$;

температура в $^{\circ}\text{C}$ буде $t = T_2 - 273^{\circ}\text{C} = 2696 - 273 = 2423^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, температура розжареної спіралі в колбі лампи потужністю 60 Вт буде 2423°C .

Примітка:

K – температура в градусах Кельвіна.

Символ позначення абсолютної термодинамічної температури – T , а термодинамічної температури в градусах Цельсія – t , позначення одиниці абсолютної температури – градуса Кельвіна – K , а термодинамічного градуса Цельсія – $^{\circ}\text{C}_{(терм)}$. Співвідношення між температурами по термодинамічній температурній шкалі:

$$t = T - 273,16^{\circ}\text{C}_{(терм)}.$$

Символ позначення міжнародної практичної температури – $t_{міжн}$, а абсолютної міжнародної температури – $T_{міжн}$. Позначення міжнародного практичного градуса Цельсія – $^{\circ}\text{C}_{міжн}$, а міжнародного градуса Кельвіна – $K_{терм}$. Співвідношення між температурами по міжнародній практичній шкалі

$$T_{міжн} = t_{міжн} + 273,16 K_{міжн}.$$

Температура за обома шкалами (термодинамічній і міжнародній практичній) може бути виражена в Кельвінах (K) і в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) в залежності від початку відліку (положення нуля).

Кельвін – одиниця вимірювання температури за термодинамічною температурною шкалою дорівнює $1/273,16$ частки інтервалу від абсолютного нуля температури до температури потрійної точки води (потрійною точкою води називається температура рівноваги між трьома фазами води: твердою (лід), рідкою (вода) і газоподібною (пара води)). Цій точці присвоєно чисельне значення $273,16 \text{ K}$.

$^{\circ}\text{C}$ – температура в градусах Цельсія.

Міжнародна практична температурна шкала 1948 р. передбачається для практичних вимірювань.

1.8.2. Баланс потужності

Згідно з законом збереження енергії потужність, що виділяє джерело електричної енергії, повинна дорівнювати потужності перетворення в колі електричної енергії в інші види енергії:

$$\sum EI = \sum RI^2, \quad (1.31)$$

де $\sum EI$ – сума потужностей, що виробляють джерела;

$\sum RI^2$ – сума потужностей усіх струмоприймачів і безповоротні перетворення енергії всередині джерел (втрати через внутрішні опори).

Рівняння (1.31) називається *балансом потужності* електричного кола.

Так, наприклад, баланс потужності для кола, що зображене на рис.(1.6,г), якщо відомі всі складові кола, буде:

$$I_1 E_1 - I_4 E_3 + I_3 E_2 + I_6 E_4 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6. \quad (1.32)$$

При розрахунках розгалужених кіл постійного струму складання балансу потужності є однією із перевірок правильного розв'язання задачі.

1.8.3. Втрати потужності і коефіцієнт корисної дії (ККД)

В реальному електричному колі, схема якого показана на (рис.1.5) 33ст., джерело електричної енергії має внутрішній опір $R_{вт}$. Між джерелом і споживачем електричної енергії з опором навантаження $R_{н}$ можуть бути ввімкнуті і інші споживачі, в яких відбуваються безповоротні перетворення електричної енергії. Наприклад, споживачі можуть знаходитися на значній відстані від джерела і їх з'єднує повітряна або кабельна лінія. На еквівалентній схемі (рис. 1.10) між джерелом і струмоприймачем ввімкнено опір $R_{л}$ – це опір проводів лінії електропередачі.

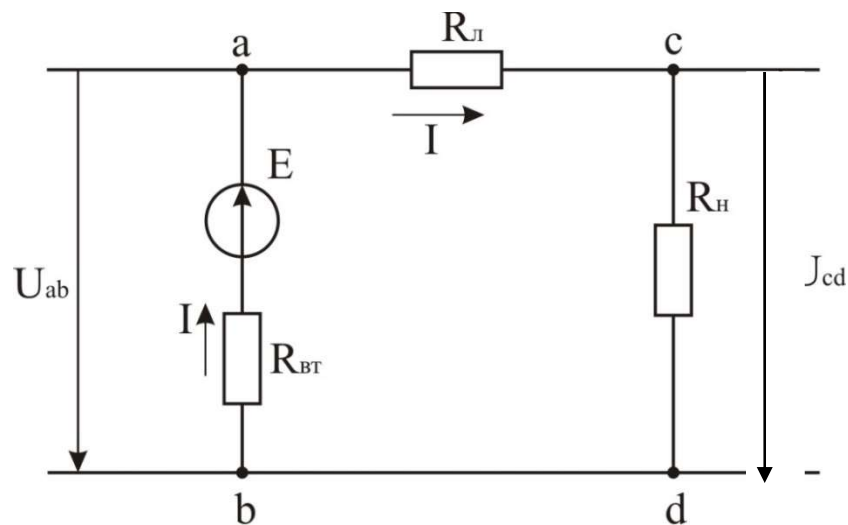


Рис. 1.11. Схема заміщення реального електричного кола

Для схеми (рис.1.10) за другим законом Кірхгофа (див. п. 1.7)

$$R_{вт} \cdot I + R_{л} \cdot I + R_{н} \cdot I = E. \quad (1.33)$$

Якщо помножити всі члени рівняння (1.33) на струм I , одержимо баланс потужності:

$$EI = I^2 R_{вт} + I^2 R_{л} + I^2 R_{н}. \quad (1.34)$$

В рівнянні (1.34) EI – потужність, що розвиває джерело;

$I^2 R_{BT}$, $I^2 R_L$ – втрати потужності в джерелі і лінії;

$I^2 R_n = U_{cd} I$ – потужність, яку використовує споживач, тобто «корисна» потужність.

Із аналізу останнього рівняння виходить, що чим менше внутрішній опір джерела R_{BT} і опір лінії R_L , тим менші безповоротні втрати потужності в цих елементах. Але зменшення опору лінії призводить до збільшення витрат матеріалів проводів (мідь, алюміній), оскільки для зменшення опору проводів необхідно збільшувати їх переріз, що не завжди економічно виправдано.

Другий спосіб зменшення втрат – підвищення напруги джерела і в лінії передачі. Дійсно, потужність споживача дорівнює $U_{cd} \cdot I$. При тому ж навантаженні споживача втрати потужності будуть меншими при підвищенні напруги, тому, що необхідний струм за тих же умов навантаження буде меншим, а втрати потужності в джерелі і лінії, як відомо, пропорційні квадратові струму, тобто зменшуються в більшій мірі. Проте збільшення напруги вимагає посилення ізоляції, що неможливо за технічними можливостями до відповідної межі і не завжди економічно вигідно. Через це питання про величину напруги лінії передачі енергії в мережі і переріз проводів вирішується шляхом техніко-економічних розрахунків і порівняння декількох варіантів. Розрахунки показують, що чим більше відстань між джерелом і приймачем, тим вигідніше використовувати більші напруги в розподільчій мережі.

1.9. Коефіцієнт корисної дії електричного кола

Коефіцієнт корисної дії (ККД) електричного кола – це відношення електричної потужності, корисно використаної в приймачах P_n , до всієї потужності P , що надійшла за той же проміжок часу в електричне коло.

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{R_n I^2}{R_{BT} I^2 + R_L I^2 + R_n I^2} = \frac{R_n}{R_{BT} + R_L + R_n}. \quad (1.35)$$

Аналіз формули (1.35) показує, що для одержання найбільшого ККД необхідно зменшувати R_{BT} і R_L , проте, зменшення опору лінії пов'язано із збільшенням витрат матеріалу провідників за рахунок підвищення їх перерізів.

В теперішній час при передачі електроенергії змінного струму на великі відстані і напругою до 750 кВ ККД досягає до 95 % і більше.

Приклад 1.6. Електричне коло (рис. 1.10) має такі дані: внутрішній опір джерела $R_{BT} = 0,2 \text{ Ом}$, опір проводів лінії $R_L = 0,8 \text{ Ом}$, опір навантаження $R_n = 19 \text{ Ом}$, ЕРС джерела $E = 120 \text{ В}$.

Визначити: струм у колі I , спади напруг U на окремих ділянках кола, потужності втрат P окремих ділянок і ККД кола η .

Розв'язання:

1. Визначимо загальний опір кола.

$$R_{\Sigma} = R_{BT} + R_{л} + R_{H} = 0.2 + 0.8 + 19 = 20 \text{ Ом}$$

2. Струм у колі.

$$I = E/R_{\Sigma} = 120/20 = 6 \text{ А}$$

3. Спади напруг,

$$U_{R_{BT}} = I \cdot R_{BT} = 6 \cdot 0.2 = 1.2 \text{ В};$$

$$U_{ac} = E - U_{BT} = 120 - 1.2 = 118.8 \text{ В};$$

$$U_{R_{л}} = I \cdot R_{л} = 6 \cdot 0.8 = 4.8 \text{ В};$$

$$U_{R_{H}} = U_{cd} = I \cdot R_{H} = 6 \cdot 19 = 114 \text{ В};$$

4. Потужності втрат,

$$R_{\Sigma} = R_{BT} + R_{л} + R_{H};$$

$$I^2 R_{\Sigma} = I^2 R_{BT} + I^2 R_{л} + I^2 R_{H};$$

$$6^2 \cdot 20 = 6^2 \cdot 0.2 + 6^2 \cdot 0.8 + 6^2 \cdot 19 = 7.2 + 28.8 + 684 = 720 \text{ Вт};$$

$$720 \text{ Вт} = 720 \text{ Вт}.$$

5. ККД,

$$\eta = \frac{P_{H}}{R_{\Sigma}} = \frac{684}{720} = 0.95.$$

1.10. Теплова дія електричного струму. Закон Джоуля-Ленца

Одним із видів перетворення електричної енергії або енергії електричного струму в інші види енергії є перехід в теплову енергію. Це перетворення електричної енергії в теплову або „теплова дія струму” відкрито незалежно Е. Ленцем і англійським фізиком Д. Джоулем. Сутність теплової дії струму і кількісна сторона явища сформовані в відомому законі Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R t, \text{ Дж} \quad (1.36)$$

$$Q = 0.24 I^2 R t = 0.24 P t, \text{ кал.} \quad (1.37)$$

Визначення закону:

кількість теплоти, яка виділяється в провіднику при проходженні по ньому струму, пропорційна квадрату сили струму, опорів та часу дії струму.

В формулах 1.36 і 1.37:

Q – кількість теплоти в Джоулях (*Дж*) або в калоріях (*кал*).

Джоуль – універсальна одиниця вимірювання роботи, енергії і кількості теплоти. Кратні одиниці кількості теплоти: кДж, МДж, ГДж, ТДж.

Джоуль визначається як робота, що утворюється силою в 1 Ньютон (N) при переміщенні точки прикладання цієї сили на 1 м за її направленням.

В розрахунках необхідно дотримуватись системи одиниць:

$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Нм};$	к – Кіло, 10^3 ;
$1 \text{ ккал} = 4.1868 \text{ Дж};$	М – Мега, 10^6 ;
$1 \text{ Мкал} = 4.1868 \text{ кДж} = 4186.8 \text{ Дж};$	Г – Гіга, 10^9 ;
$1 \text{ Мкал} = 4.1868 \text{ МДж} = 4.1868 \cdot 10^6 \text{ Дж};$	Т – Тера, 10^{12} .
$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Н м/с};$	
$1 \text{ кВт год} = 864 \text{ ккал}.$	



Джоуль Джеймс Прескотт (24.12.1818 – 11.10.1889) – англійський фізик, один із першовідкривачів закону збереження енергії. В 1841 р. незалежно від Е. Ленца встановив закон виділення тепла в провіднику при проходженні електричного струму. Винайшов явище насичення феромагнітних матеріалів; розробив кінетичну теорію газів та інше.

Емілій Ленц Христіанович (24.02.1804 – 10.02.1865) – фізик. В 1842 р. незалежно від Д.Джоуля відкрив закон виділення тепла електричним струмом в провідниках. В 1883 р. встановив правило визначення напрямлення електрорушійної сили індукції (закон Ленца). Сумісно із Б. Якобі вперше розробив методи розрахунків електромагнітів в електричних машинах, відкрив оборотність електричних машин. Створив загальну теорію електричних машин. Займався також фізико-географічними дослідженнями, брав участь в кругосвітньому плаванні тощо.

Якщо в формулі (1.37) виразити час t в годинах, а потужність P в кіловатах, тоді співвідношення між електроенергією в кіловат-годинах і кількістю тепла Q в кілокалоріях можна показати наступним чином

$$Q = 864 P \cdot t, \text{ ккал},$$

тобто 1 кВт. год. електроенергії відповідає 864 ккал.

Закон Джоуля-Ленца має величезне значення для практичного використання цієї категорії працівників, якщо відповідають за пожежний стан як у виробництві, так і в побуті.

Знання та розуміння суті нагрівання провідників струмом дають можливість, в залежності від конкретної структури електричної мережі чи електроустановки, визначити найбільш пожежонебезпечні ділянки електричного кола, в яких проходять значні за силою електричні струми, що виділяють велику кількість теплоти і здатні створити джерело запалювання. Такий аналіз дає можливість вчасно реагувати на виникнення можливої пожежі та застосовувати відповідні протипожежні заходи.

Теплову дію струму при експлуатації електричного обладнання і силових мереж слід розглядати за двох умов: перша – це корисне практичне використання у сфері людської діяльності в (промисловому та сільськогосподарському виробництвах, в побуті та інших галузях господарювання); друга – некорисна, непередбачена, шкідлива, що призводить до виникнення пожеж або вибухонебезпечної ситуації.

1.10.1. Корисне використання теплової дії струму

Процеси, в результаті яких теплова енергія, одержана при перетворенні електричної енергії, використовується з певною технологічною метою, називають електротермічними процесами.

Пристрої, що використовуються для проведення тих чи інших електротермічних процесів, разом з джерелом живлення і пусковою та регулювальною апаратурою, називають електротермічними установками.

На основі електротермічних процесів організовано виробництво карбідів кремнію, бору і електрокорунда, що використовуються для виготовлення високоякісних абразивних виробів, без яких не може нормально працювати жодне машинобудівне виробництво. Електротермічним шляхом виробляють карбід кальцію, що використовується для одержання ацетилену, що споживається в великих кількостях при автогенному зварюванні і розрізанні металів, а також для одержання синтетичного спирту, уксусної кислоти і інших хімічних продуктів.

Електротермічні способи використовуються для одержання електрографіту, високовогнетривких керамічних матеріалів і кварцового скла, фосфатної кислоти і інших матеріалів.

Різноманітні виробництва сучасного машинобудування (виробництво парових і газових турбін, реактивних двигунів, атомних силових установок, космічних кораблів і тощо) потребують спеціальної високоякісної сталі і сплавів з особливими фізичними властивостями: з високою механічною міцністю за нормальних та високих температур, з підвищеною стійкістю проти окислення і дії агресивного оточення, з високою жаростійкістю, жароміцністю і тощо.

Виробництво таких спеціальних сталей і сплавів відбувається тільки електротермічним способом в електричних печах.

Успіхи, що досягнуті в результаті використання напівпровідників в радіотехніці, автоматиці, засобах інформації, обчислювальній техніці, стали можливими тільки завдяки одержанню особливо чистих напівпровідникових матеріалів в спеціальних електротермічних установках.

Для одержання великої кількості тепла, при перетворенні електричної в теплову енергію, електротеплові установки ділять на чотири групи:

- нагрівання за методом опору;
- електродугове нагрівання;
- індукційне нагрівання;
- діелектричне нагрівання.

1.10.2. Шкідлива та пожежонебезпечна теплова дія струму

Друга умова теплової дії струму – це негативні, некорисні явища та ситуації, що утворюються в діючих мережах і електроустановках внаслідок порушення ізоляції їх цілісності або втрата нормального робочого стану, визначеного технологічним процесом і умовами експлуатації. В таких випадках струми в струмопровідниках можуть досягати великих критичних величин, а кількість теплоти, що виділяється, здатна утворити аварійну ситуацію і призвести до вибуху, пожежі та інших небезпечних явищ.

При розгляданні питань пожежної безпеки електроустановок необхідно враховувати дві складові пожежі: джерела запалювання і горючої речовини. Джерелом запалювання в електроустановках слугує високий потенціал енергії здатний як в нормальному, так і в аварійному режимах (перевантаження, короткі замикання та інші) утворювати високотемпературні ділянки, здатні запалювати займисті ізоляції і захисну оболонку електропроводів, займисті конструктивні елементи будівель і споруд, по яких вони прокладаються (біля яких вони розташовуються). Одночасна присутність цих двох складових пожежі дозволяє з впевненістю констатувати, що будь-який електричний пристрій – це пожежонебезпечний об'єкт.

Пожежна безпека електроустановок і електрообладнання здебільшого виникає внаслідок трьох шкідливих проявів теплової дії електричного струму саме:

-здатності струмоведучих провідників за певних умов (струмові та технологічні перевантаження, короткі замикання, комутаційні та атмосферні перенапруги, високі перехідні опори і інші) стати джерелом пожежі в результаті займання особистої ізоляції з подальшим нагріванням

та займанням конструктивних елементів та горючих речовин і матеріалів, розташованих в безпосередній близькості;

-здатності ізоляційних матеріалів розповсюджувати горіння по шляху їх прокладання при займанні від побічних джерел неелектричного походження;

-здатності утворювати в момент короткого замикання іскри, дуги та розплавлених металевих часток провідників.

Статистика пожеж в електроустановках показує, що найбільш розповсюдженими шкідливими тепловими діями струму є короткі замикання і перевантаження. Розглянемо їх більш докладно.

1.10.2.1. Короткі замикання

Короткі замикання (КЗ) – це непередбачене нормальними умовами роботи замикання між струмоведучими провідниками і сприймачі електричної енергії виявляються замкненими накоротко (опір навантаження і спад напруги в місці КЗ дорівнюють нулю).

Основною причиною виникнення КЗ є руйнування ізоляції струмоведучих провідників в процесі монтажу і експлуатації, викликаних тепловим старінням ізоляційних матеріалів, перенапругами в електричній мережі, механічними пошкодженнями, дією агресивного навколишнього середовища і т. п.

Теплове старіння ізоляції найчастіше виникає внаслідок перевантажень струмами, що перевищують допустимі величини для даного перерізу провідника.

Відносний строк служби ізоляції визначається по емпіричному (восьмиградусному) правилу, згідно з яким підвищення температури провідника на $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ зменшує строк служби ізоляції вдвічі.

Старіння ізоляції – природний процес, що характеризується зменшенням її еластичності, електричної та механічної міцності. Наслідками цього можуть бути електричний пробій ізоляції і ушкодження електроустановки, а за наявності горючої ізоляції і пожежонебезпечного середовища – пожежа або вибух.

Вид КЗ між двома проводами показаний на рис. 1.12.

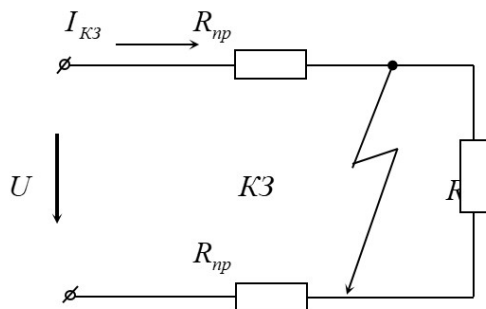


Рис. 1.12. Вид КЗ між двома проводами

$R_{нр}$ – опір проводів від джерела живлення до навантаження;

R_H – опір навантаження (струмоприймачів);

$KЗ$ – точка короткого замикання

(з'єднання між собою двох струмонесучих проводів)

Зазвичай в електричних установках опір проводів від джерела живлення до навантаження $2R_{нр}$ не перевищує 5 – 10 % опору струмоприймачів. Ці співвідношення забезпечують корисне використання електричної енергії в навантаженні і зменшують безкорисні втрати на нагрівання проводів.

А чотому при КЗ і при співвідношенні $R_{нр} = (0.05: 0.1) R_H$ струм в колі різко збільшується і може досягати сотень і тисяч ампер залежно від напруги і потужності електромережі.

Дійсно, для приведеної схеми, струм у колі до короткого замикання:

$$I = \frac{U}{R_H + 2R_{нр}}; \quad (1.38)$$

а в момент виникнення короткого замикання

$$I_{к.з.} = \frac{U}{2R_{нр}} = \frac{U}{0,1R_H}. \quad (1.39)$$

Тобто за сталою напругою U він збільшується в 10 разів. Внаслідок цього різко зростає температура проводів, яка може досягати такого значення, при якому може не тільки плавиться і займатися ізоляція проводів, але і розплавиться сам провід внаслідок утворення в точці КЗ електричної дуги, а великий струм миттєво нагріває провідники по всій довжині кола від точки КЗ до джерела живлення.

При цьому розплавлені частинки металу провідника розлітаються навколо місця КЗ. Час дії КЗ залежить від сили струму та стану мережі і може сягати від одиниць до десятків секунд.

Джерелами запалювання при КЗ є не тільки висока температура електричної дуги, але й бризки розплавленого металу. Отже, від цих

джерел запалювання можуть займатися горюча ізоляція та інші деталі і конструкції електроустановок, а також горюче навколишнє середовище.

Найбільш розповсюдженими видами КЗ є однофазні (між фазою та нульовим провідником, між фазою та корпусом електроустановки), двофазні (між двома фазними провідниками) та трифазні (одночасно між трьома фазними провідниками).

Повне трифазне КЗ на шинах підстанції або розподільного пристрою є найбільш катастрофічним. В такому разі виділяється така кількість теплової енергії, що струмопровідні мідні шини горять синім полум'ям, алюмінієві та залізні конструкції розплавляються з виділенням великої кількості бризків розплавленого металу. Трифазне КЗ – це жахлива аварія.

КЗ є найхарактернішою причиною виникнення пожеж в електроустановках і складає більше 50 %.

Стан КЗ може тривати до тих пір, поки електричне коло залишається замкненим. Коло може розірватись або апаратом захисту, або самовільно, коли розплавиться якась частина проводів мережі і розірве коло. Якщо правильно вибрані апарати захисту, то коло буде розірваним за доли секунди і виникнення дуги не відбудеться.

1.10.2.2. Струмові перевантаження

Термін «струмові перевантаження» вид аварійного режиму коли в струмопровідниках виникає величина струму, що перевищує його допустиме номінальне значення.

Розрізняють перевантаження нормальні і аварійні. Перші виникають в процесі нормальної експлуатації електроустановок і не призводять до небезпечних наслідків. Повтор перевантаженнями, наприклад, є пускові струми асинхронних двигунів. Аварійні перевантаження виникають в процесі нормальної експлуатації електроустановок і не призводять до небезпечних наслідків. Такого роду перевантаження, наприклад, являються пускові струми асинхронних двигунів. Аварійні перевантаження виникають з різних причин. Найчастіше - підключення нових навантажень, що призводить до збільшення величини струму на окремих ділянках кола вище допустимого (за умовами нагрівання) значення. Як відомо, в правилах будови електроустановок ПУЕ (δ) наводяться відповідні норми сьосовно значення струмового навантаження в залежності від матеріалу, площі поперечного перерізу, умов прокладання проводів і температури навколишнього середовища (див. глава 1.3 ПУЕ - 2017). Якщо струм провідника є більше норми, яка встановленої ПУЕ, то провідник перегрівается до неприпустимих для його ізоляції температур, що неодмінно призведе до його займання і виникнення пожежі. Аналогічна ситуація створюється, якщо площа поперечного перерізу провідника вибрана неправильно, тобто без урахування вимог ПУЕ. В окремих

випадках при грубих помилках у виборі перерізу живильних проводів кратність перевантаження може мати таке високе значення, що тривалість існування аварійного режиму (до спрацювання захисту або перегорання проводу) може складати частки секунди, тобто бути такого ж, як і тривалість тривалого КЗ. І навпаки, тривалість КЗ в мережах напругою 380 В великої протяжності може бути досить значимого і не відрізняється від тривалості звичайного перевантаження.

Основною принциповою ознакою, за якою КЗ слід відрізнити від перевантаження, є момент порушення ізоляції в процесі аварійного режиму: при КЗ, порушення ізоляції є причиною аварійного режиму, а при перевантаженні - його можливим наслідком.

Режим перевантаження відрізняється від КЗ з точки зору пожежної небезпеки значно меншим виділенням часток розплавленого металу із зони плавлення струмопровідних жил провідників, ніж при КЗ. За інших рівних умов, перевантаження не менше пожежонебезпечні, ніж КЗ.

1.10.2.3. Перехідні опори

Причиною аварійних ситуацій в електроустановках і як наслідок пожежі, можуть слугувати *перехідні опори*, що виникають в місцях з'єднання проводів, кабелів, шин, приладів керування і захисту, в ковзних контактах електричних машин тощо. Пошкодження струмоведучих частин та пожежі від великих перехідних опорів виникають не рідше, ніж від перевантажень. На виробництві вони відбуваються частіше, ніж в побуті через велику кількість контактних з'єднань.

Перехідним опором називається опір в місцях переходу струму із одного контакту на другий через площину (точки) їх стикання. При поганому контакті перехідний опір може досягати значних величин. Із формули (1.9) $R = \rho \frac{l}{S}$ при $S \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$, за законом Джоуля-Ленца (за незмінною величиною струму),

$$Q = I^2 R t \text{ також } \rightarrow \infty.$$

Як правило, на практиці великі перехідні опори виникають в місцях:

- з'єднання провідників із різнорідних матеріалів мідь-алюміній, алюміній-залізо – з часом алюміній здатний втрачати пружність і виникає послаблення контакту, його нагрівання, окислювання й утворення великого перехідного опору;

- холодних, недбайливо виконаних скруток жил проводів в мережах, розгалужувальних коробках і інших з'єднаннях, виконаних тимчасово і залишених на постійній основі;

- ковзних з'єднань в апаратах і приладах: робочих контактах магнітних контакторів, пускачів, контролерів, теплових реле, плавких запобіжників, штепсельних розеток, патронів тощо;

- впливу хімічно активного навколишнього середовища (пара, волога, кислоти, луги, підвищена температура).

Крім цього, відбувається природне псування контактуючих поверхонь за рахунок окислювання металів (корозії), з часом з'являється втома металів у з'єднаннях, яка призводить до послаблення сили взаємного притискання контактів.

Повинні чітко виконуватися попереджувально-планові ремонти і огляди електрообладнання, під час яких виконують дрібний і поточний ремонти апаратів захисту і керування та підтягування контактів у з'єднаннях.

Таким чином, для запобігання нагрівання від великих перехідних опорів та запобігання пожежі, особливу увагу слід приділяти з'єднанню струмоведучих частин між собою, а також підключенню їх до клем машин і апаратів. Існує декілька способів з'єднання проводів: зварювання, паяння і механічне з'єднання. Для зручності і покращення контакту використовують затискачі і накінечники.

Зварювання – найнадійніший спосіб з'єднання, який забезпечує якісний (цілісний) контакт, особливе значення цей спосіб має для сирих і особливо сирих приміщень. Незручність цього способу полягає в тому, що його неможливо використовувати у пожежо- та вибухонебезпечних зонах, при працюючих агрегатах.

Паяння також забезпечує досить надійний контакт, але за такої умови потрібне додаткове джерело теплоти (наприклад, газова пальничка) для плавлення припою.

Треба мати на увазі, що при зварюванні та паянні ізольованих проводів необхідно вжити заходи застереження, що виключають займання і пошкодження ізоляції.

Нині найбільш розповсюджений *механічний спосіб з'єднання* проводів опресуванням за допомогою кліщів або гідропресу. Цей спосіб дозволяє виконувати роботи за наявності вибухонебезпечного середовища і не потребує джерела теплової енергії, але забезпечує досить надійний електричний контакт.

У розподільчих та інших пристроях, де використовуються струмопроводи значних перерізів – шини, щільність їх з'єднання забезпечується гвинтовим способом (гвинт – шайба – гайка). Гвинтові з'єднання гарантують надійний контакт при з'єднанні конструктивних струмоведучих елементів мідь – мідь, або алюміній – алюміній.

З'єднання мідь – алюміній небажані через різницю в їх міцності, алюміній менш тривкий і з часом контактне з'єднання погіршується, що

призводить до утворення значних перехідних опорів і нагрівання контактуючих поверхонь. Тому такі з'єднання потребують додаткового використання шайб типу «гравер» і більш досконалого і постійного нагляду та контролю.

Наприкінці відзначимо, що запобігання КЗ, перевантажень та великих перехідних опорів забезпечується правильним проектуванням, якісним монтажем і технічно грамотною експлуатацією електроустановок.

Основними технічними засобами запобігання аварійних режимів є захист електричних мереж і електроустановок плавкими запобіжниками, автоматичними вимикачами та іншими апаратами.

Одночасно відзначимо, що апарати захисту не можуть створити умови запобігання проявів КЗ чи перевантажень, ці пристрої призначені тільки для своєчасного вимикання аварійної ділянки електричного кола.

Запитання та завдання для самоконтролю.

1. Що таке електричний заряд, як можна виявити наявність струму у провіднику?
2. Від чого залежить електричний опір провідника, за яким законом визначається величина струму на ділянці кола?
3. Що таке електричне коло? З яких елементів воно складається? Наведіть приклади джерел і споживачів електричної енергії.
4. Що таке собою схема електричного кола? Вкажіть основні види електричних схем, що використовуються на практиці.
5. Поясніть процеси, що відбуваються в електричному колі, енергія і потужність в електричному колі.
6. Наведіть формули визначення і вкажіть одиниці виміру потенціалу ЕРС, напруги, струму, енергії та потужності.
7. Електричне коло освітлення виконане за схемою, яка дозволяє вмикати і вимикати мережу з двох різних точок (наприклад, на початку та вкінці коридору великої довжини).
8. Охарактеризуйте практичне значення балансу потужності та коефіцієнта корисної дії електричного кола.
9. Сформулюйте закон Джоуля-Ленца та наведіть приклади практичного використання теплової дії струму.
10. Вкажіть причини, що призводять до шкідливої та пожежонебезпечної теплової дії струму.
11. Яке практичне значення має перетворення електричної енергії в світлову. Які найбільш поширені джерела світла?

ДОДАТКИ 1

Таблиця Д. 1.1

Основні характеристики провідникових матеріалів

Найменування матеріалу	Густина кг/м ²	Температура плавлення °С	Питомий Опір 10 ⁻⁶ , Ом·м	Питома провідність 10 ⁶ См/м	Температурний коефіцієнт опору 10 ⁻³ , 1/К
Мідь	8900	1083	0.0175	57	4.11-4.20
Алюміній	2700	657-660	0.0278	35	4.31-4.39
Латунь	8500	900-960	0.04	25	2.70-2.80
Сталь	7900	1400-1530	0.13	7.6	5.7-6.2
Вольфрам	19100	3370-3400	0.0612	16.34	4.1-5.0
Ніхром	8200	1375	0.98	1.02	0.15
Платина	21400	1773	0.09-0.105	11-9.52	2.57
Срібло	10500	960.5	0.016-0.0162	62.5-61.7	3.4-3.6

Таблиця Д.1.2.

**Умовні графічні позначення деяких елементів і пристроїв у
електричних схемах**

№ П/П	Найменування	Умовне графічне позначення	Дволітерний код
1	<u>Котушки електромагнітних пристроїв</u> Котушка пускача чи реле. (загальне позначення)		КМ
2	Котушка електромагнітного пристрою з вказаним видом обмотки: обмотка струму I, обмотка напруги U і інші.		КІ
3	а) Реле електротеплове без самоповернення (повернення за допомогою кнопки); б) Контакт теплового реле.		КК
4	<u>Контакти в колах керування</u> <u>Загальне позначення</u> а) замикаючий		К... Другу літеру контакту визначає апарат, який його комутує. (наприклад, КМ-контакт магнітного пускача)
	б) розмикаючий		
	в) перемикаючий		
5	<u>Контакт для комутації силового кола</u> а) замикаючий		К
	б) розмикаючий		

6	<p><u>Вимикач кнопковий натискний</u> а) з замикаючим контактом</p>		SB
	<p>б) з розмикаючим контактом</p>		
7	<p><u>Котушки індуктивності</u> а) без осердя</p>		
	<p>б) з осердям, або дросель</p>		
8	<p><u>Трансформатори напруги:</u> а) однофазний з феромагнітним осердям</p>		TV
	<p>б) трифазний силовий З'єднання обмоток високої напруги (ВН) і низької напруги (НН) зірка-зірка з виведеною нейтральною точкою N</p>		T
9	<p>Трансформатор струму з однією вторинною обмоткою</p>		TA
10	<p>Автотрансформатор напруги однофазний з феромагнітним осердям</p>		TV
11	<p>Резистори: а) постійний</p>		R
	<p>б) змінний</p>		

Продовження таблиці Д. 1.2.

12	<p><u>Запобіжники:</u> а) запобіжник плавкий (загальне позначення)</p>		FU
	б) швидкодіючий (миттєвого спрацювання за струмом)		FA
	в) запобіжник із вимикаючим пристроєм		FU
13	<p><u>Конденсатори:</u> а) постійної ємності</p>		С К-конденсатор; 40-Паперовий; Із фольговою обкладкою.
	б) змінної ємності		КПЕ
	в) електролітичний полярний		К50-20 20мкФ 100В
	неполярний		К50
	г) варіконд		Ємність залежить від напруги
14	<p><u>Вимикачі однополюсні:</u> а) із замикаючим контактом</p>		SA
	б) із розмикаючим контактом		
	в) контакт автоматичного вимикача		SF

Продовження таблиці Д. 1.2.

15	<p><u>Вимикаючі триполюсні</u> а) неавтоматичний, ручний (роз'єднувач), рубильник, РПБ-рубильник із боковим важільним приводом</p>		QS
	<p>б) автоматичний захист: I>максимальних струмів (КЗ); T>тепловий (віт перевантажень струмових)</p>		QF
16	<p>в) силові контакти магнітного пускача</p>		KM
17	<p><u>Елементи електричних машин</u> а) статор електричної машини</p>		Всередині кола допускається вказувати такі дані: G-генератор, M-двигун, B-збуджувач, BR-тахогенератор
	<p>б) ротор електричної машини</p>		-
	<p>в) двигуни асинхронні з короткозамкненим ротором</p>		-
	<p>г) машина постійного струму з незалежним збудженням</p>		-
18	<p><u>Прилади освітлення:</u> а) лампа розжарювання освітлювальна</p>		EL
	<p>б) лампа розжарювання сигнальна</p>		HL
	<p>в) лампа люмінесцентна освітлювальна (низького тиску)</p>		EL (ЛД)
19	<p><u>Прилади вимірювальні:</u> амперметр, вольтметр, ватметр, омметр, частотомір, лічильник імпульсів, лічильник активної енергії, лічильник реактивної енергії</p>		PA PV PW PR PF PC PI PK

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Загальні відомості

Грунтовне вивчення явищ електрики бере свій початок більше, ніж 200 років тому. Більше половини цього часу розвиток електротехніки відбувався за рахунок вивчення статичної електрики та створення хімічних джерел постійного струму. В 1775 році видатний італійський фізик і фізіолог Алессандро Вольт побудував прилад – електрофор. Незважаючи на те, що цей прилад був дуже простим, він відіграв значну роль в розумінні сутності електрики. Прилад складався із сургучної подушки та металевого диска зі скляною ручкою. При натиранні шерстю сургучної подушки остання отримувала значний статичний електричний заряд. При повторюванні циклу опускання металевого диска на заряджений сургуч і відведення його назад, за допомогою пальця експериментатора диск розряджався з виникненням яскравого світіння у вигляді дуги. Це явище описане Вольттом, пізніше назвали вольтовою дугою.

Електрофор на той час був новим і зручним приладом для одержання значних статичних розрядів електрики і проведення дослідів з їх використанням.

Головним відкриттям А. Волта став винахід у 1800 році першого в світі хімічного джерела постійного струму – вольтового стовпа. Це був винахід джерела електрики нового, невідомого виду, не електрики, що накопичувалася на сургучі чи шматку янтарю, а електрики рухомої, динамічної і потужної. В подальшому Вольт удосконалював свої «стовпи» і одержував досить потужні на той час джерела електрики. За допомогою цих джерел Волта здебільшого проводив дослідження впливу електрики на живі організми, в тому числі і на людину (на собі).

Більш досконалий винахід в 1802 році зробив фізик і електротехнік Василь Петров. Він сконструював велику гальванічну батарею, яка складалась із 2100 мідно-цинкових пластин із електрорушійною силою 1700 В. Виконавши ряд дослідів, Петров відкрив потужну електричну дугу і показав можливість її практичного використання для освітлення, зварювання та плавлення металів.

Незабаром дуга Петрова була використана для створення електродугових ліхтарів. В цих ліхтарях для одержання енергії випромінювання застосовувались два загострених вугільних електроди у вигляді стрижнів, роз'єднаних між собою на відстань декількох міліметрів. Якщо ці два електроди під'єднати до досить сильного джерела струму, то між кінцями стрижнів виникає коротке замикання у вигляді дуги і утворюється полум'я із яскравим світлом сліпучої сили.

Початок 19 століття ознаменувався широким використанням дугових ліхтарів для освітлення вулиць і майданів у всіх столицях Європи.

Водночас дугові лампи мали значну незручність – за мірою вигорання електродів необхідно було постійно посувати їх назустріч один одному. Як тільки відстань між ними перевищувала деякий допустимий мінімум, світло лампи ставало нерівномірним, вона починала мерехтати і затухати.

У 1873 році електротехнік Лодигін розробив електричну лампу розжарювання з ниткою із роторного вугілля. Він також першим почав відкачувати повітря із балона. Перші електричні лампи розжарювання виготовлялись напругою 65 В, тобто на ту напругу, яка застосовувалась для живлення дугових ліхтарів. У 1870 році з'явилися і генератори постійного струму на цей рівень напруги. Першим генератором, що знайшов практичне використання, був генератор Грамма французької фірми «Альянс».

Динамо-машини постійного струму Грамма одержали широке розповсюдження в найрізноманітніших галузях виробництва. З цього часу з'явилась можливість легко і швидко перетворювати механічну енергію в електричну.

Пізніше, коли навчились послідовно з'єднувати дугові ліхтарі, з'явилась необхідність в більш високій напрузі 110 і 220 В. Лампи розжарювання також почали виготовляти на ці рівні напруг.

На той час передавати електроенергію на порівняно далекі відстані при відносно низьких напругах 110 і 220 В постійного струму було практично неможливо через великі втрати енергії в проводах ліній електропередач. Тому для окремих підприємств, адміністративних центрів і в окремих районах споруджували індивідуальні місцеві електростанції невеликої потужності постійного струму. Ця тенденція в нашій країні зберігалась аж до 40–50 років минулого століття.

Отже, було зрозуміло, що більш висока напруга давала можливість збільшити радіус передачі електроенергії, а тому почали виробляти генератори і використовувати напругу 440 В постійного струму. Рівень напруг 110, 220 і 440 В постійного струму збереглися і до сьогодні.

Недоліком кіл постійного струму є неможливість трансформації електричної енергії від високої напруги до більш низької і навпаки. Для одержання різних рівнів напруг необхідно будувати окремі генератори або використовувати напівпровідникові керовані випрямлячі, що не завжди економічно вигідно.

Водночас керовані випрямлячі дають можливість за призначенням електроустановки використовувати раціональний для неї вид струму.

Незважаючи на те, що у М.О. Доливо-Добровольським 1891 році була винайдена і розроблена система трифазного струму, завдяки якій до сьогодні у всьому світі виробляється, розподіляється і використовується електрична енергія, постійний струм не втратив свого значення.

До переваг кіл постійного струму по відношенню до змінного струму слід віднести:

1) споживачі постійного струму невеликих потужностей, але широко розповсюджені, можуть працювати від первинних хімічних елементів (батарей), що дає можливість їх використовувати для живлення переносних приладів як промислового, так і побутового призначення;

2) можливість накопичувати деяку кількість електроенергії у вторинних джерелах – акумуляторах, які знайшли винятково широке розповсюдження на електротранспорті, автомобільному, повітряному, морському і в багатьох сферах людської діяльності;

3) кола постійного струму з двигунами постійного струму є конкурентоспроможними в електроприводі таких механізмів і пристроїв, робота яких пов'язана з частим пусканням, реверсуванням та розвиванням значних пускових моментів, а також з необхідністю частого і плавного регулювання їхньої частоти обертання або швидкості руху. Залізничний транспорт, електрокари і електровози, трамвай, тролейбус, метрополітен – всі вони приводяться в рух за допомогою двигунів постійного струму з послідовним збудженням. Крім того, високоточні вантажо-підіймальні механізми, телеграф, телетайп, телефон, радіомовлення, телебачення і багато іншого – все це складові кіл постійного струму.

Взагалі, вивчення процесів, що відбуваються у колах постійного струму є основою знань з електротехніки і фундаментом для освоєння інших, більш складних її розділів та інших прикладних електротехнічних дисциплін.

2.2. Нерозгалужені та розгалужені електричні кола

2.2.1. Нерозгалужені електричні кола з послідовним з'єднанням опорів

Нерозгалуженими називають такі кола, що не мають жодної точки, в якій з'єднувалось би більше ніж два провідники. Нерозгалужене коло не має жодних відгалужень, а тому у всіх його точках значення струму одне і те ж. У загальному випадку до складу нерозгалуженого кола може входити декілька джерел E і декілька опорів R .

З'єднання, де через кожний елемент схеми протікає один і той же струм, називається послідовним. В такому колі утворюється тільки один провідний замкнений контур для струму. Приклади послідовних схем приведені на (рис. 2.1).

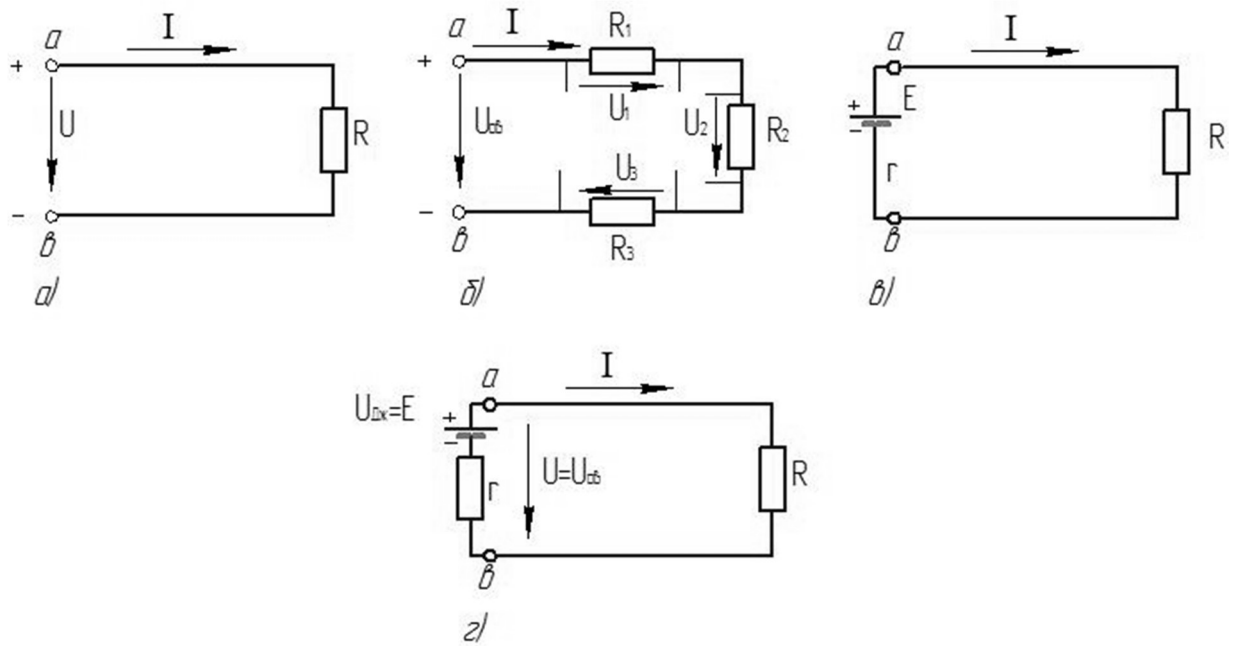


Рис. 2.1. Послідовне з'єднання опорів:

- а) найпростіше послідовне коло; б) послідовне з'єднання трьох опорів; в) послідовне коло із заданими ЕРС E і внутрішнім опором r ; г) коло, еквівалентне схемі б**

В найпростішому послідовному колі (рис 2.1, а) співвідношення між струмом і напругою визначається законом Ома в його основній формі:

$$I = \frac{U}{R}$$

Якщо в послідовному колі (рис. 2.1, б) ввімкнемо не один, а декілька опорів, то струм у колі буде визначатися з урахуванням величин всіх опорів.

Як уже відзначалось, при послідовному з'єднанні опорів сила струму в усіх ділянках кола однакова незалежно від величини опорів.

Величина напруги, що прикладена до затискачів зовнішньої частини кола U_{ab} в послідовному колі постійного струму, за законом розподілу напруги (другий закон Кірхгофа), дорівнює сумі (арифметичній) спадів напруг на окремих ділянках кола:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3; = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_{екв}. \quad (2.1)$$

$$де \quad R_{екв.} = R_1 + R_2 + R_3 = \sum R$$

Із формули (2.1) випливає, що у колі з послідовним з'єднанням опорів загальний або еквівалентний опір дорівнює сумі опорів усіх ділянок кола.

Таким чином, декілька послідовно з'єднаних опорів можна замінити одним опором і тим самим звести таку схему до показаної на рис 2.1, а. Тоді струм у колі визначиться за співвідношенням:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U}{\sum R}. \quad (2.2)$$

При послідовному з'єднанні опорів (рис. 2.1,б) напруга на ділянках розподіляється пропорційно опорам цих ділянок:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2} \text{ або } \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.3)$$

Якщо взяти співвідношення напруг окремих ділянок до загальної напруги одержимо формули розрахунків напруг окремих ділянок через загальну напругу і опори в такому вигляді:

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_{\text{екв}}}; U_2 = U \frac{R_2}{R_{\text{екв}}}; U_3 = U \frac{R_3}{R_{\text{екв}}} \quad (2.4)$$

або $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3 = \frac{1}{G_1} : \frac{1}{G_2} : \frac{1}{G_3},$

де G – відповідні провідності.

Якщо помножити обидві частини рівняння (2.1) на струм I , то одержимо рівняння потужностей:

$$I^2 R_{\text{екв.}} = I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3$$

або $P = P_1 + P_2 + P_3.$ (2.5)

Рівняння (2.5) відображають баланс потужності електричного кола: потужність джерела живлення дорівнює сумі потужностей окремих його ділянок.

Розглянемо (рис.2.1, в) і виведемо формулу розрахунку струму для кола із джерелом живлення, для якого задані ЕРС E і внутрішній опір $R_{\text{вн}}$.

Замінімо цю схему еквівалентною їй схемою, що показана на рис (2.1, з), на якій внутрішній опір джерела показано окремо, а джерело ЕРС припускається джерелом без внутрішнього опору, тобто джерелом, у якого $U_{\text{дж}} = E$. У такому разі для цієї схеми закон Ома може бути зображено в наступнім чином:

$$I = \frac{U_{\text{дж}}}{R + R_{\text{вн}}} \text{ або } I = \frac{E}{R + R_{\text{вн}}}. \quad (2.6)$$

Ця форма закону Ома і буде відображати співвідношення між струмом і напругою у колі і називається законом Ома для електричного кола.

Формула (2.6) може бути подана в іншому вигляді. Враховуючи, що спад напруги $U = IR$ на опорі R дорівнює напрузі $U_{ав} = U$ на затискачах $ав$ джерела енергії, одержимо:

$$E = U + I \cdot R_{вн} \text{ або } U = E - I \cdot R_{вн}. \quad (2.7)$$

Із формули (2.7) можна зробити висновок, що будь-які джерела, що мають внутрішній опір $R_{вн}$, не рівним нулю, напруга на затискачах при зміні струму в колі не залишається постійною, а знижується за мірою збільшенням струму. Залежність $U(I)$, як це видно із рівнянь (2.7), має лінійний характер і називається зовнішньою характеристикою джерела енергії (рис 2.2).

За відсутності струму ($I = 0$) напруга на затискачах джерела, як уже відзначалось, стає рівною ЕРС E , що можна спостерігати на (рис.2.2).

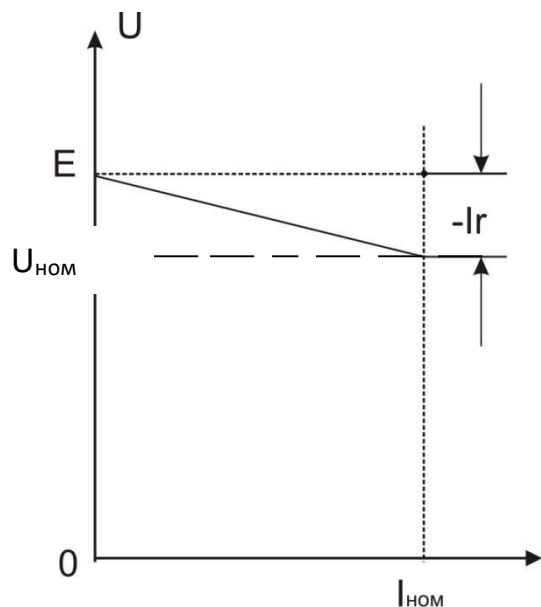


Рис. 2.2. Зовнішня характеристика джерела енергії

Практичною зацікавленістю є коло з декількома послідовно ввімкненими джерелами електричної енергії, які утворюють разом із споживачами (навантаженнями) один замкнений контур для струму. Якщо джерела з'єднані так, що напрямки дії ЕРС співпадають, то з'єднання називаються узгодженими, якщо напрямки дії ЕРС джерел не співпадають, то з'єднання називається неузгодженими.

Розглянемо випадок узгодженого з'єднання вмикання джерел, показаний на (рис. 2.3). При узгодженому з'єднанні джерела з'єднуються між собою різнойменними затискачами.

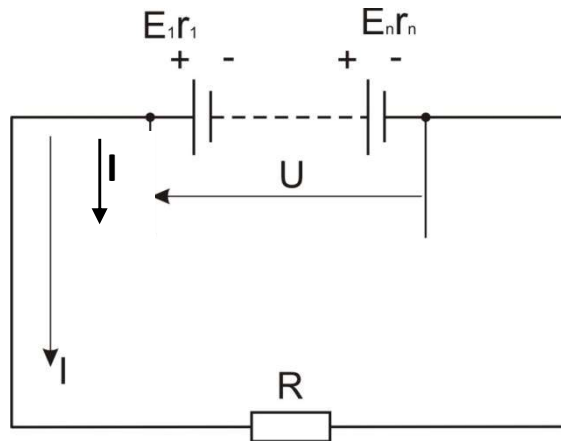


Рис. 2.3. Узгоджене з'єднання джерел живлення

За узгодженим послідовним з'єднанням джерел (ЕРС всіх джерел підтримують у колі струм одного і того ж напрямку) їх результативна дія у колі рівнозначна дії одного еквівалентного джерела, ЕРС якого дорівнює сумі ЕРС окремих джерел, а внутрішній опір дорівнює сумі внутрішніх опорів тих же джерел.

Таким чином, при послідовному узгодженому з'єднанні джерел їх ЕРС складаються. Цілком очевидно, що в разі неузгодженого послідовного з'єднання, наприклад, двох джерел, електрорушійна сила еквівалентного джерела або результативна ЕРС дорівнює різниці ЕРС джерел і направлена в бік дії більшої ЕРС.

В загальному вигляді для послідовного кола з декількома послідовно з'єднаними джерелами і опорами, закон Ома може бути написаним в наступній формі:

$$I = \frac{\sum E_n}{R + \sum R_{en}}, \quad (2.8)$$

де під сумою $\sum E_n$ слід розуміти алгебраїчну суму, $\sum R$ - арифметичну.

Зазвичай на практиці використовується тільки узгоджене послідовне вмикання джерел електричної енергії, так як таким чином досягається підвищення результативної ЕРС по відношенню до ЕРС окремих джерел; прикладом може бути акумуляторна батарея. Проте випадки неузгодженого вмикання нерідко зустрічаються в електротехнічних пристроях і апаратах, у яких виникають протиелектрорушійні сили (проти - ЕРС), як, наприклад, в двигунах постійного струму або в електричних акумуляторах при їх зарядженні.

2.2.2. Переваги і недоліки кіл з послідовним з'єднанням опорів

Основною перевагою послідовного кола є простота його виконання користування ним та необхідних розрахунків. Основний недолік цього кола – порушення роботи всього кола, тобто всіх джерел і всіх споживачів, при розірванні кола на будь-якій ділянці або при аварії з будь-яким джерелом або споживачем. У послідовному колі існує повна взаємозалежність в роботі окремих її елементів. Наприклад, при послідовному з'єднанні електричних освітлювальних ламп перегорання однієї із них призводить до згасання усіх інших; неможливо також вмикати або вимикати кожен лампочку окремо, так як струм у колі протікає тільки при замиканні всього кола. Цей серйозний недолік пояснює, через що послідовне з'єднання споживачів або джерел електричної енергії на практиці застосовується рідко.

До послідовного з'єднання джерел енергії звертаються тільки у тих випадках, коли ЕРС одного джерела менше необхідної напруги, як наприклад, в акумуляторних батареях. Напруга одного акумулятора складає 1,5-2 В в залежності від його типу, в той час як для живлення споживачів електричної енергії бувають необхідними напруги 24; 36; 110; 220 і 440 В. В таких випадках доводиться з'єднувати певну кількість акумуляторів послідовно.

Послідовне з'єднання споживачів застосовується лише у тих випадках, коли напруга мережі живлення більша за номінальну напругу, на яку розрахований споживач. Так, наприклад, електричні лампи розжарювання для загально промислового та побутового освітлення виготовляються на напруги 127 і 220 В, а напруга живлення освітлення пасажирського салону в міському електротранспорті біля 600 В. Отже, звідси виникає необхідність вмикати лампи послідовно групами по три лампи на 220 В або по п'ять ламп на 127 В.

Для послідовного вмикання споживачів зазвичай необхідно, щоб споживачі мали однакові опори. В протилежному випадку прикладена напруга розподілиться між споживачами нерівномірно, окремі споживачі можуть опинитися під недопустимо високими для них напругами, що неминуче призведе до їх пошкодження. Даний приклад бути проілюстрований розв'язанням задачі 2.1.

Приклад 2.1 Дві лампи розжарювання на номінальну напругу $U_{ном} = 110В$, (потужність однієї лампи $P_1 = 100Вт$, а другої $P_2 = 200Вт$) з'єднані послідовно на напругу $U = 220В$. Необхідно розрахувати розподіл напруги між лампами і тим самим визначити умови їх сумісної роботи.

Розв'язання:

1. Визначаємо опір кожної лампи за формулою:

$$P = \frac{U^2}{R},$$

опір лампи потужністю P_1 :

$$R_1 = \frac{U_{НОМ}^2}{P_1} = \frac{110^2}{100} = \frac{12100}{100} = 121 \text{ Ом},$$

опір лампи потужністю P_2 :

$$R_2 = \frac{U_{НОМ}^2}{P_2} = \frac{110^2}{200} = \frac{12100}{200} = 60,5 \text{ Ом}.$$

2. Загальний опір кола при послідовному з'єднанні:

$$R_{заг.} = R_1 + R_2 = 121 + 60,5 = 181,5 \text{ Ом}.$$

3. Струм у колі:

$$I = \frac{U}{R_{заг.}} = \frac{220U}{181,5} = 1,21A.$$

4. За таким струмом у колі напруга на лампі потужністю $100Вт$:

$$U_1 = IR_1 = 1,21 \cdot 121 = 146В,$$

напруга ж на лампі потужністю $200Вт$:

$$U_2 = IR_2 = 1,21 \cdot 60,5 = 73В.$$

Із одержаних результатів розрахунку зрозуміло, що перша лампа потужністю 100 Вт опинилась під недопустимо великою напругою (146 В замість 110 В) і вона через деякий короткий проміжок часу перегорить; друга ж лампа потужністю 200 Вт буде мати значне недорозжарювання (73 В замість 110 В) і буде горіти тьмяно, а коли перегорить перша лампа, друга також потухне, через розірвання послідовного кола першою лампою, що перегоріла.

2.2.3. Розгалужені електричні кола

Розгалуженими називаються кола до складу яких входять характерні ділянки: вузли, вітки і контури.

Як уже відзначалось, на початку розвитку електротехніки практично застосовували лише електричні кола з послідовним з'єднанням елементів як більш зручні і прості в експлуатації. В подальшому, через недоліки послідовних схем від них відмовились і стали використовувати електричні кола з паралельним з'єднанням елементів або так звані розгалужені електричні кола.

Під паралельним з'єднанням розуміється приєднання джерел живлення і споживачів до двох загальних точок – вузлів кола. Одержана при такому з'єднанні схема показана на рис. 2.4. Вона має, як видно із

рисунка, загальні для всього кола вузлові точки a і b , в яких з'єднані проводи джерела живлення (напруги) і споживачів (R_1, R_2, R_3), і які утворюють окремі вітки електричного кола, в даному випадку три вітки зі струмами I_1, I_2, I_3 .

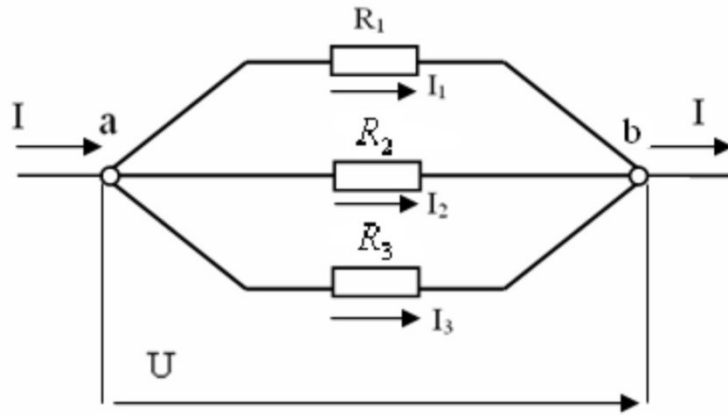


Рис. 2.4. Паралельне з'єднання опорів

Розглядаючи таке розгалужене коло, неважко переконатися в основній перевазі паралельного з'єднання, а саме – незалежній (будь-якої вітки) роботі як джерела, так і приймача. Дійсно, при розмиканні любої із віток проходження струму в інших вітках не припиняється (а лише змінюється).

У випадку паралельного з'єднання декількох віток на кінцях кожної із віток діє одна і та ж напруга U , яка дорівнює напрузі джерела живлення. У випадку відсутності джерела ЕРС у вітках, напруга U між затискачами ab може бути визначена як $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$ (Рис. 2.4). Звідки може бути визначений струм у кожній вітці.

Замінюючи опір R зворотною йому величиною – провідністю G визначаємо струми:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = UG_1; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = UG_2; \quad I_3 = \frac{U}{R_3} = UG_3. \quad (2.9)$$

Для заміни всіх паралельних віток однією еквівалентною віткою остання повинна мати таку еквівалентну провідність $G_{екв.}$, щоб при тій же самій напрузі U у колі протікав би струм I , рівний струмові в нерозгалуженій частині кола:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = UG_1 + UG_2 + UG_3 = U(G_1 + G_2 + G_3) = UG_{екв.} = \frac{U}{R_{екв.}}, \quad (2.10)$$

де

$$G_{екв.} = G_1 + G_2 + G_3;$$

$$\frac{1}{R_{екв.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Отже, таким чином еквівалентна провідність декількох паралельних віток дорівнює сумі провідностей окремих віток.

Струми в окремих вітках при паралельному з'єднанні розподіляються прямо пропорційно провідностям або обернено пропорційно опорам:

$$I_1 : I_2 : I_3 = G_1 : G_2 : G_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} . \quad (2.11)$$

Для двох паралельних віток

$$G_{екв.} = G_1 + G_2, \text{ або } \frac{1}{R_{екв.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (2.12)$$

$$R_{екв.} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Із співвідношень

$$I = \frac{U}{R_{екв.}} = \frac{U}{R_1 \cdot R_2} (R_1 + R_2), \quad I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ і } I_2 = \frac{U}{R_2}$$

впливає, що струми I_1 , I_2 у двох паралельних вітках можна виразити через струм I в нерозгалуженій частині кола:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = I \frac{G_1}{G_1 + G_2} \quad (2.13)$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = I \frac{G_2}{G_1 + G_2} .$$

Для трьох паралельно з'єднаних опорів еквівалентний опір буде:

$$\frac{1}{R_{екв.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.14)$$

$$R_{екв.} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1}$$

Для кількості n рівнозначних опорів R при паралельному з'єднанні еквівалентний опір буде:

$$R_{екв.} = \frac{R}{n} . \quad (2.15)$$

Як уже відзначалось, струм у нерозгалуженій частині кола дорівнює (арифметичній) сумі струмів окремих паралельно з'єднаних віток.

Якщо обидві частини рівняння $I = I_1 + I_2 + I_3$ помножити на прикладену напругу U , одержимо рівняння потужності:

$$\begin{aligned}
 UI &= UI_1 + UI_2 + UI_3 \\
 \text{або } P_{\text{заг.}} &= P_1 + P_2 + P_3; \\
 I^2 R_{\text{екв.}} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3.
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Тобто загальна потужність, яку споживає електричне коло, або баланс потужності кола дорівнює сумі потужностей окремих паралельно з'єднаних споживачів.

Приклад 2.2. Електричне коло постійного струму, що приведене на (рис. 2.4) має такі складові елементи: $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 10 \text{ Ом}$; $R_3 = 15 \text{ Ом}$, напруга живлення мережі $U = 110 \text{ В}$. Визначити струм I в нерозгалуженій частині кола, струми I_1 , I_2 , I_3 у вітках, потужності в окремих вітках та скласти баланс потужності.

Розв'язання.

1. Еквівалентний опір всього електричного кола знаходимо із формули його еквівалентної провідності:

а)

$$G_{\text{екв.}} = \frac{1}{R_{\text{екв.}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{15} = \frac{11}{30} \text{ Ом}$$

або

$$R_{\text{екв.}} = \frac{1}{G_{\text{екв.}}} = \frac{30}{11} = 2,73 \text{ Ом}$$

б) другий спосіб визначення еквівалентного опору (2.14):

$$R_{\text{екв.}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} = \frac{5 \cdot 10 \cdot 15}{5 \cdot 10 + 10 \cdot 15 + 15 \cdot 5} = 2,73 \text{ Ом.}$$

2. Визначаємо струми:

Струм в нерозгалуженій частині електричного кола:

$$I = \frac{U}{R_{\text{екв.}}} = \frac{110}{2,73} = 40,3 \text{ А.}$$

Струм в вітці із резистором R_1 :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{110}{5} = 22 \text{ А.}$$

Струм в вітці із резистором R_2 :

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{110}{10} = 11 \text{ А}$$

Струм в вітці із резистором R_3 :

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{110}{15} = 7,33 \text{ А}$$

3. Перевірка за балансом струмів:

$$I = I_1 + I_2 + I_3;$$

$$40,3 A = 22 A + 11 A + 7,33 A = 40,3 A.$$

4. Потужності, що споживаються окремими вітками:

$$P_1 = UI_1 = 110 \cdot 22 = 2420 \text{ Вт}$$

$$P_2 = UI_2 = 110 \cdot 11 = 1210 \text{ Вт}$$

$$P_3 = UI_3 = 110 \cdot 7,33 = 806 \text{ Вт}$$

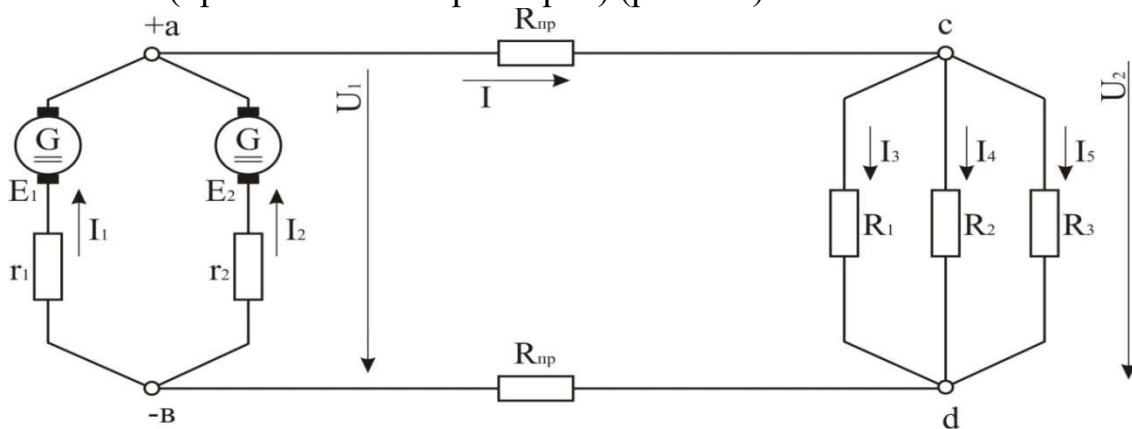
5. Баланс потужності або загальна потужність, що споживається КОЛОМ:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 2420 + 1210 + 806 = 4436 \text{ Вт} \approx 4,4 \text{ кВт};$$

або $I^2 R_{\text{екв.}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3; 40,3^2 \cdot 2,73 = 22^2 \cdot 5 + 11^2 \cdot 10 + 7,33^2 \cdot 1$
 $4436 \text{ Вт} = 4436 \text{ Вт}.$

Крім схем з послідовним і паралельним з'єднанням, існують ще і мішані схеми з послідовно-паралельним з'єднанням, в яких окремі ділянки електричного кола з'єднані паралельно, а інші послідовно. Такі схеми одержали назву складних розгалужених схем.

Прикладом паралельно-послідовного або мішаного кола може слугувати принципова схема електропостачання: електростанція – об'єкт споживання (приймання електроенергії) (рис. 2.5):



Електростанція
(джерело електроенергії)

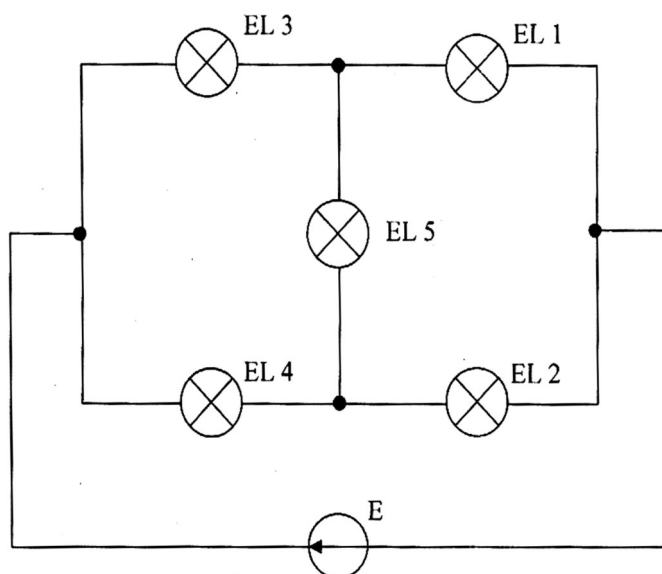
Приймачі
електроенергії

Рис. 2.5. Мішане з'єднання елементів кола

В приведеній схемі джерела електричної енергії ввімкнені, як зазвичай на електричних станціях, паралельно. Потім йдуть послідовно з'єднані із джерелами провода лінії електропередачі значної протяжності, що мають опори $R_{\text{пр.}}$, зв'язують джерела із приймачами і називаються електричною мережею. Нарешті, в кінці мережі послідовно з опорами проводів і паралельно між собою ввімкнені приймачі електричної енергії з опорами R_1, R_2, R_3 .

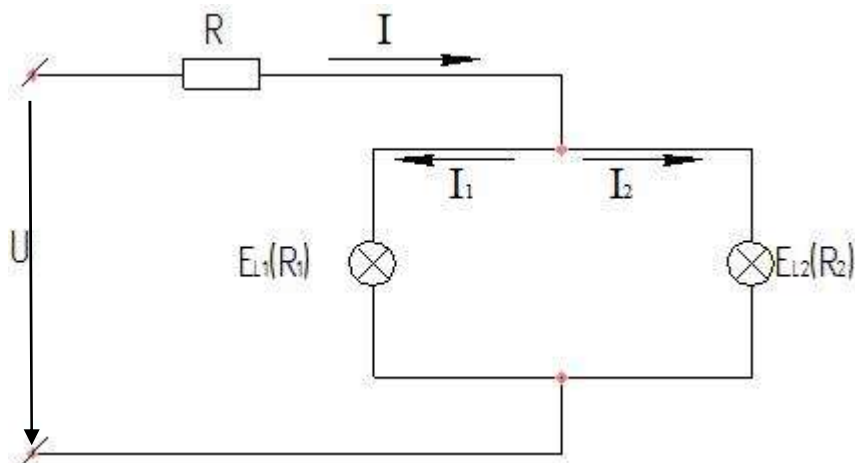
Поміркувати:

1. Які лампочки не будуть горіти при такій схемі з'єднання, якщо потужність лампочок однакова.



2. Як з'єднати у схему чотири резистора з однаковим опором R так, щоб загальний опір кола був також R .

3. Через додатковий опір $R = 536$ Ом від мережі напругою 220 В живляться дві лампочки розжарювання. Одна із них має опір $R_1 = 21$ Ом. В другій відомий струм $I_2 = 0,3$ А. Визначити опір другої лампочки R_2 .



Відповідь $R_2 = 21$ Ом.

2.3. Методи розрахунку електричних кіл постійного струму

2.3.1. Застосування законів Кірхгофа для розрахунку електричних кіл

Будь-який метод розрахунку електричних кіл ґрунтується на законах Кірхгофа. Це пов'язано з тим, що параметри будь-якого кола можна повністю визначити за цими законами. На практиці розрахунків їх найчастіше використовують в складних колах з декількома джерелами електричної енергії.

Розрахувати електричне коло – означає знайти значення струмів, напруг і потужностей всіх або деяких певних ділянок кола. При цьому задається схема з відповідними значеннями елементів.

Послідовність виконання розрахунків.

1) Для заданої електричної схеми визначається кількість вузлів q , віток p і незалежних контурів n .

2) Довільно на схемі у вітках позначаються напрями струмів.

3) Визначається, скільки рівнянь необхідно скласти за першим законом Кірхгофа і скільки за другим.

Загальна кількість рівнянь повинна дорівнювати числу невідомих струмів, тобто дорівнювати числу віток p . За першим законом Кірхгофа складається $q-1$ рівнянь (де q – число вузлів схеми), а за другим законом – n рівнянь $n = p(q-1)$, при цьому необхідно вибирати додатні напрями обходу (або навпаки) для всіх контурів однаковими, наприклад, за годинниковою стрілкою. При обході контура у вибраному напрямку ЕРС записуються із знаком плюс, якщо її напрямок співпадає з напрямком обходу контура, і зі знаком мінус в протилежному випадку, спад напруги на окремих елементах записується зі знаком плюс, якщо напрямок обходу вітки співпадає з позначеним напрямком струму, і зі знаком мінус в протилежному випадку.

4) Розв'язання сформованої системи рівнянь дає можливість визначити значення струмів у вітках.

Після складання системи рівнянь і знаходження величин струмів в кожній із віток для перевірки правильності розрахунків використовується рівняння балансу потужностей: алгебраїчна сума потужностей, що віддають джерела, повинна дорівнювати сумі потужностей, поглинених всіма споживачами:

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k .$$

Якщо в результаті розрахунків деякі із струмів отримують від'ємне значення, це означає, що вибраний початковий напрям струму неправильний і не відповідає дійсному напрямку струму.

Приклад 2.3. За методом рівнянь Кірхгофа розрахувати струми у вітках електричного кола, схема якого зображена на (рис 2.8). Параметри елементів електричного кола мають такі значення: $E_1 = 50V$, $E_2 = 20V$, $R_1 = 18 \text{ Ом}$, $R_2 = 9 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$.

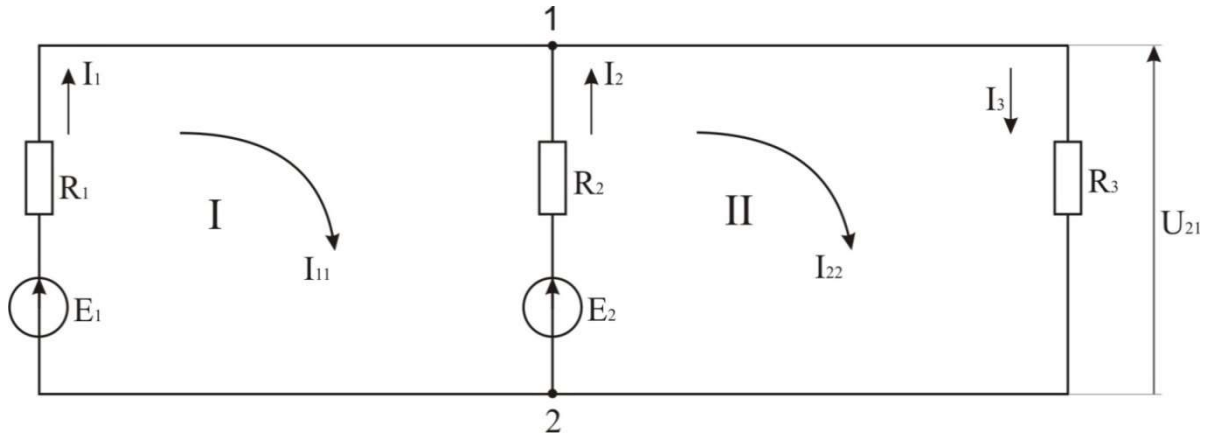


Рис. 2.8. Схема для визначення струмів у вітках (до задачі 2.3)

Розв'язання.

1. Визначаємо кількість вузлів, віток і контурів у схемі: $q = 2$, $p = 3$, $n = 2$.

2. Довільно задаємо і позначаємо на схемі умовно додатні напрямки струмів у вітках.

3. Складаємо $q - 1 = 2 - 1 = 1$ рівнянь за першим законом Кірхгофа (для вузла 1) та $n=2$ рівняння за другим законом Кірхгофа для контурів I і II, прийнявши додатні напрями обходу контурів за годинниковою стрілкою.

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 & (1) \\ I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1 - E_2 & (2) \\ I_3 R_3 + I_2 R_2 = E_2 & (3) \end{cases}$$

4. З числовими значеннями опорів система рівнянь (1, 2, 3) буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 & (1') \\ 18I_1 + 9I_2 = 50 - 20; 18I_1 + 9I_2 = 30 & (2') \\ 30I_3 + 9I_2 = 20; 9I_2 + 30(I_1 + I_2) = 20 & (3') \end{cases}$$

5. Спростуємо рівняння 2'; 3':

$$\begin{aligned} 18I_1 - 9I_2 &= 30; & 6I_1 - 3I_2 &= 10; \\ 9I_2 + 39I_2 &= 20; & 30I_1 + 39I_2 &= 20; \end{aligned}$$

6. Розраховуємо струми:

Із рівняння 2' визначаємо значення струму I_1 :

$$I_1 = \frac{10}{6} + 0,5I_2 = 1,67 + 0,5I_2 A$$

Підставляємо значення струму I_1 в рівняння 3’:

$$30(1,67 + 0,5I_2); 39I_2 = 20; 50 + 15I_2 + 39I_2 = 20.$$

і одержимо значення струму I_2 :

$$I_2 = \frac{20 - 50}{54} = -\frac{30}{54} = -0,56 A$$

знак мінус свідчить про те, що струм I_2 у вітці 1, 2 (рис.2.8) протікає в напрямку, протилежному до того напрямку, що показаний на рисунку).

Відповідною підстановкою значення струму I_2 в рівняння 2’ одержимо величину струму I_1 :

$$I_1 = \frac{10}{6} + 0,5 \cdot (-0,56) = 1,66 - 0,28 = 1,38 A$$

Із рівняння 1’ визначимо струм I_3 :

$$I_3 = I_1 + I_2 = 1,38 - 0,56 = 0,83 A.$$

7. Перевірка.

Підставляємо значення струмів I_1 і I_3 у вихідне рівняння 3.

$$I_3 R_3 + I_2 R_2 = E_2; 0,83 \cdot 30 + (-0,56) \cdot 9 = 20 B;$$

$$24,9 - 4,9 = 20;$$

$$20 B = 20 B.$$

Таким чином, баланс напруг повністю збігається.

Складаємо баланс потужностей:

$$I_1 E_1 - I_2 E_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3;$$

$$1,38 \cdot 50 - 0,56 \cdot 20 = 1,38^2 \cdot 18 + 0,56^2 \cdot 9 + 0,83^2 \cdot 30;$$

$$69 - 11,2 = 34,3 + 2,82 + 20,66;$$

$$57,8 W = 57,78 W.$$

Баланс потужностей також збігається.

Задача розрахована правильно.

Розрахунок електричних кіл за законом Кірхгофа математично складний, через це за можливості слід застосувати більш прості способи розрахунків.

2.3.2. Метод контурних струмів

Цей метод є похідним від методу застосування законів Кірхгофа. Він дозволяє зменшити кількість рівнянь при розрахунках струмів до кількості незалежних контурів, що входять до схеми.

Контурний струм – це умовний струм, який належить якому-небудь контуру і який проходить по всіх вітках цього контура. Кількість контурних струмів визначається структурою конкретного електричного кола. Напрямок струму кожного контура вибирається довільно, а напрям обходу контура – за напрямом його струму.

Для кожного контура складається рівняння за другим законом Кірхгофа. При цьому для суміжних віток, що входять до складу двох або більше контурів, спади напруг записуються від усіх контурних струмів зі своїми знаками.

Дійсні струми у зовнішніх (не суміжних) вітках будуть дорівнювати за значенням контурним струмам. Струми суміжних віток будуть дорівнювати різниці контурних струмів сусідніх контурів. За таких умов зі знаком «+» записується контурний струм, що співпадає з напрямом струму в суміжній вітці.

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа, до власних опорів контурів входять опори усіх елементів, що складають даний контур.

Розглянемо у вигляді прикладу схему рис. 2,9, що утримує шість віток і чотири вузли. Для складання рівнянь за другим законом Кірхгофа виберемо взаємно незалежні контури так, щоб одна із віток відповідного контуру входила тільки в цей контур. Наприклад, у схемі рис. 2,9 перша, друга і третя вітки входять відповідно тільки в контури 1-2-4-1, 2-3-4-2 і 1-4-3-1.

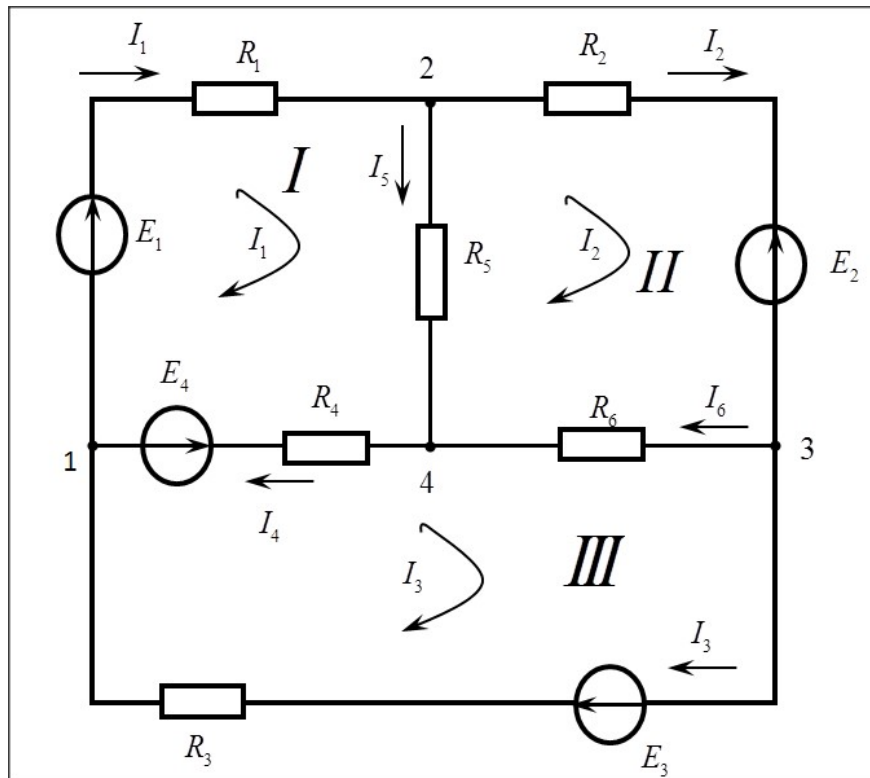


Рисунок 2.9 Розгалужене коло з трьома контурами

Для схеми Рис. 2.9 маємо: на підставі першого закону Кірхгофа:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Для вузла 1: } I_1 - I_4 - I_3 = 0 \\ \text{Для вузла 2: } I_5 - I_2 - I_1 = 0 \\ \text{Для вузла 3: } I_6 - I_3 - I_2 = 0 \end{array} \right\} = 0 \quad (2.17)$$

На підставі другого закону Кірхгофа:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Для контуру 1: } E_1 - E_4 = R_1 I_1 + R_5 I_5 + R_4 I_4 \\ \text{Для контуру 2: } -E_2 = R_2 I_2 + R_6 I_6 + R_5 I_5 \\ \text{Для контуру 3: } E_4 + E_3 = R_3 I_3 - R_4 I_4 - R_6 I_6 \end{array} \right\} \quad (2.18)$$

Користуючись рівнянням (2.17), виключимо із рівняння (2.18) струми I_4 , I_5 та I_6 , які є загальними для декількох струмів. В результаті одержимо:

$$\left. \begin{array}{l} E_1 - E_4 = (R_1 + R_4 + R_5)I_1 + R_5 I_2 + R_4 I_3 \\ -E_2 = -R_5 I_1 + (R_2 + R_6 + R_5)I_2 + R_6 I_3 \\ E_4 + E_3 = -R_4 I_1 - R_6 I_2 - (R_6 + R_3 + R_4)I_3 \end{array} \right\} \quad (2.19)$$

У відповідності з рівнянням (2.19) можна прийняти, що кожний із струмів I_1, I_2 та I_3 замикається в одному із контурів і називати такі струми контурними. Напруги на опорах будь-якого контуру визначаються алгебраїчною сумою напруг, обумовлених струмом свого і суміжних контурів. Наприклад, в контурі із опорів R_1, R_5 та R_4 різниця ЕРС $E_1 - E_4$ дорівнює сумі трьох напруг: від особистого контурного струму I_1 на всіх опорах цього контуру і від струмів I_2 і I_3 відповідно на опорах R_5 і R_4 . Дійсні струми у вітках, загальних для декількох контурів, знаходяться шляхом алгебраїчного підсумовування контурних струмів.

$$I_4 = I_1 - I_3; I_5 = I_1 - I_2 \text{ та } I_6 = I_2 - I_3 .$$

Із цього прикладу випливає, для визначення струмів у вітках цим методом достатньо ввести в розрахунок контурні струми і скласти рівняння тільки на підставі другого закону Кірхгофа: число цих рівнянь менше за число невідомих струмів віток на число вузлів схеми без одного ($n-1$). За заміною струмів у вітках контурними струмами автоматично задовольняється перший закон Кірхгофа, так як кожний контурний струм в одній із віток контра має реальний напрям до вузла, а в другий – від того ж вузла. Наприклад, для вузла Рис. 2,9 по першому закону Кірхгофа для струмів віток маємо:

$$I_4 - I_5 - I_6 = 0$$

Або для контурних струмів

$$I_1 - I_3 - (I_1 - I_2) - (I_2 - I_3) = 0 .$$

Приклад 2.4. За даними прикладу 2.3. у схемі (рис. 2.8) визначити струми у вітках методом контурних струмів.

Розв'язання.

1. Позначимо контурні струми I_{11} і I_{22} відповідно в контурах I і II . Напрямок струмів у вітках контуру вибирається довільно, а напрям обходу контура – за напрямом його струму.

2. Запишемо систему рівнянь для контурних струмів I_{11} і I_{22} :

$$\begin{cases} (R_1 + R_2)I_{11} - R_2I_{22} = E_1 - E_2; \\ (R_2 + R_3)I_{22} - R_2I_{11} = E_2; \end{cases}$$

Підставляємо в цю систему рівнянь відомі значення опорів:

$$\begin{cases} (18 + 19)I_{11} - 9I_{22} = 50 - 20; \\ (9 + 30)I_{22} - 9I_{11} = 20; \end{cases}$$

отримаємо

$$\begin{cases} 27I_{11} - 9I_{22} = 30; \\ 39I_{22} - 9I_{11} = 20; \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} 39I_{22} - 9I_{11} = 20; \end{cases} \quad (2.21)$$

3. Із рівняння (2.20) визначимо значення контурного струму I_{22} у загальному вигляді:

$$I_{22} = (3I_{11} - 3,33)A \quad (2.22)$$

4. Підстановкою значення I_{22} в рівняння (2.21) одержимо значення контурного струму I_{11} :

$$39(3I_{11} - 3,33) - 9I_{11} = 20;$$

$$117I_{11} - 129,87 - 9I_{11} = 20;$$

$$108I_{11} = +149,87;$$

$$I_{11} = \frac{149,87}{108} = 1,38A.$$

5. Підстановкою значення струму I_{11} в рівняння (2.22) одержимо величину контурного струму I_{22} :

$$I_{22} = 3 \cdot 1,38 - 3,33 = 0,83A$$

6. Значення струмів, що протікають у зовнішніх вітках схеми за величиною рівні контурним струмам, тобто: $I_{11} = I_1 = 1,38A$; $I_{22} = I_3 = 0,83A$.

7. Значення струму у сумісній вітці між вузлами 1.2 визначається як алгебраїчна сума контурних струмів:

$$I_2 = I_{22} - I_{11} = 0,81 - 1,38 = -0,57A. \quad (2.23)$$

Отже, як бачимо за розрахунками струмів методом контурних струмів величини струмів у вітках збігаються з розрахунками за методом використання законів Кірхгофа, але кількість рівнянь за методом контурних струмів знадобилось на одне рівняння менше і математичні розрахунки стали простішими.

2.3.3. Метод вузлової напруги

Метод вузлової напруги застосовується для розрахунків електричних схем, що утворюють два вузли (рис. 2.8) (кількість віток не обмежується).

Ідея методу полягає в тому, що при розрахунках складається одне рівняння, в якому невідомою величиною є напруга між цими вузлами, яка називається вузловою напругою. (На рис. 2.8 – U_{21}), а потім за законом Ома розраховуються струми у вітках.

Значення вузлової напруги отримуємо на підставі першого закону Кірхгофа, з якого визначаємо вузлову напругу за виразом:

$$U_{21} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}, \quad (2.24)$$

де E_k – ЕРС k -ї вітки, B ;

$G_k = \frac{1}{R_k}$ – провідність k -ї вітки, C_m (сіменс);

n – кількість віток.

Добуток $E_k G_k$ береться зі знаком плюс «+», якщо E_k спрямована до вузла, і зі знаком мінус «-» якщо від вузла.

Приклад 2.5. За даними прикладу 2.3. у схемі (рис. 2.8) визначити струм у вітках методом двох вузлів (1,2).

Розв'язання.

1. Визначаємо напругу U_{21} між вузлами:

$$\begin{aligned} U_{21} &= \frac{E_1 \cdot \frac{1}{R_1} + E_2 \cdot \frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{50 \cdot \frac{1}{18} + 20 \cdot \frac{1}{9}}{\frac{1}{18} + \frac{1}{9} + \frac{1}{30}} = \\ &= \frac{2,8 + 2,22}{0,055 + 0,11 + 0,033} = \frac{5,02}{0,198} = 25B \end{aligned}$$

2. Розраховуємо струми у вітках:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{21}}{R_1} = \frac{50 - 25}{18} = 1,38 A;$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{21}}{R_2} = \frac{20 - 25}{9} = -0,56 A;$$

$$I_3 = \frac{U_{21}}{R_3} = \frac{25}{30} = 0,83 A.$$

Результат розрахунків показує, що величини струмів збігаються з попередніми розрахунками.

2.3.4. Методи перетворення схем

Часто при розв'язуванні складних схем, що складаються із лінійних опорів, можна спростити дану схему, замінюючи частину опорів еквівалентним опором, в якому опори з'єднані не так, як в початковій схемі.

Прикладами таких перетворень може слугувати заміна декількох паралельно або послідовно з'єднаних опорів одним. У цьому випадку загальний опір визначається за відомими формулами (див. п. 2.2.).

У багатьох випадках елементи схем з'єднуються таким чином, що можна виділити групи із трьох елементів, які утворюють трипроменево зірку або трикутник. Ці з'єднання не можна віднести ні до послідовних, ні до паралельних з'єднань. Їх взаємне еквівалентне перетворення в багатьох випадках дозволяє спростити схему і звести її до схеми мішаного з'єднання опорів.

На рис. 2.10 (а) зображена частина електричної схеми, що має вигляд трикутника, вершини якого - вузли, а сторони – вітки. Таке з'єднання віток з опорами називається з'єднанням в трикутник (трикутник опорів).

У багатьох випадках за перетворенням складних розгалужених електричних схем виникає необхідність заміни трикутника опорів новим з'єднанням віток з опорами, що мають вигляд трипромінної зірки (рис. 2,10 (б)), у якої одні кінці опорів з'єднані в загальну вузлову точку, а інші приєднані до тих же вузлів, що в трикутнику. Таке з'єднання віток з опорами називається з'єднанням трипроменевою зіркою (зіркою опорів).

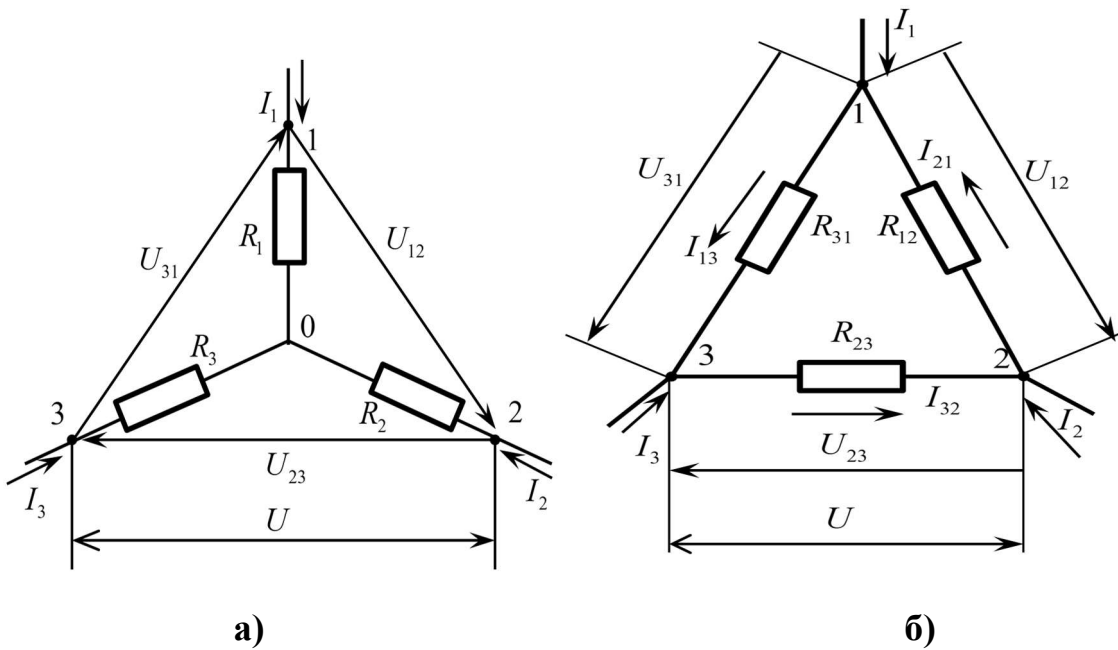
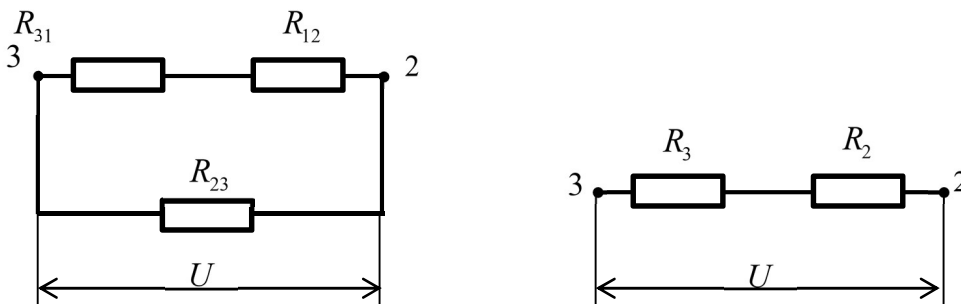


Рис. 2.10. Схеми з'єднання опорів: а) трикутником; б) зіркою.

Для розрахунків електричних кіл, що утримують з'єднання опорів трикутником і зіркою необхідно дотримування умови, щоб при різних прикладених напругах між трьома точками 1, 2, 3 (вершинами) трикутника і зірки як у водному, так і в іншому випадку струм в проводах живлення повинні бути однієї величини.

Припустимо, що напруга живлення спочатку прикладається до точок 2 і 3 (рис. 2.10), потім до точок 1 і 2 та 3 і 1. За таких умов отримуємо наступні еквівалентні схеми з'єднання опорів:



Для одержання формул перетворення опорів трикутника у еквівалентну зірку визначимо еквівалентні опори схем відносно точок 2-3 (рис. 2,10 (а) і рис. 2,10 (б)):

$$R_{екв\Delta} = \frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}; R_{екв*} = R_{2+R_3} \quad (2.25)$$

За методом перетворення схем опори між відповідними точками трикутника і зірки повинні мати одні і ті ж значення. Для виконання цієї

умови порівнюємо еквівалентні опори кожної гілки схем, з'єднаних трикутником і зіркою.

При підключенні напруги живлення до точок 2-3:

$$R_2 + R_3 = \frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}} = \frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{\Delta}}.$$

Аналогічно до точок 3-1 і 1-2:

$$R_3 + R_1 = \frac{R_{31}(R_{23} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}} = \frac{R_{31}(R_{23} + R_{12})}{R_{\Delta}};$$

$$R_1 + R_2 = \frac{R_{12}(R_{31} + R_{23})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}} = \frac{R_{12}(R_{31} + R_{23})}{R_{\Delta}}.$$

Якщо скласти два із цих рівнянь і відняти третє, наприклад, склавши перше і останнє, відняти друге, ми одержимо, що шуканий опір в променях зірки через відомі значення опорів сторін трикутника буде відповідно дорівнювати:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{\Delta}};$$

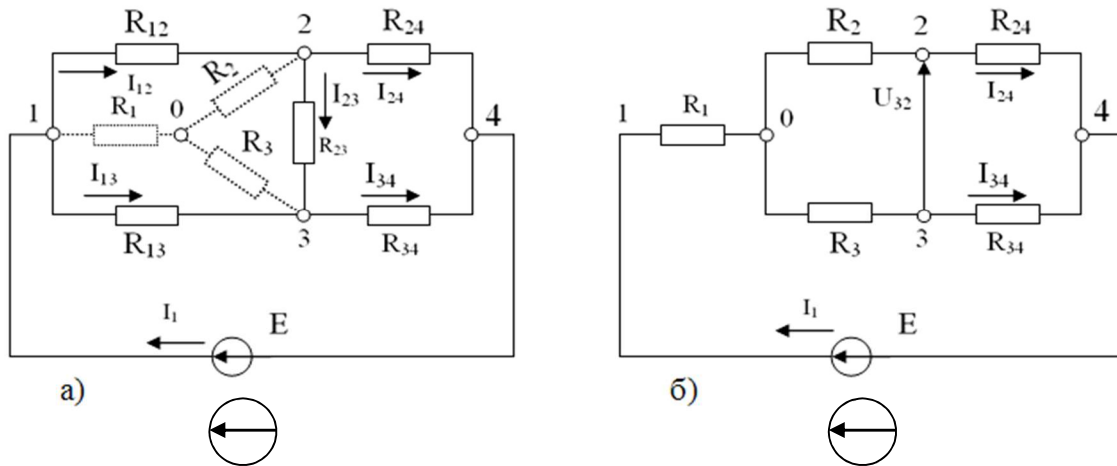
$$R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{\Delta}};$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{\Delta}}.$$

Навпаки, будь-яка трипроменева зірка можна перетворити в еквівалентний трикутник. Для отримання відповідних співвідношень між складовими опорами трикутника і зірки, аналогічно попередньому, визначаємо еквівалентні опори як для трикутника, так і для зірки між точками, наприклад: точка 1, 3 з однієї сторони з'єднати накоротко точками 2 і 3 з другої сторони і виконуючи відповідні математичні перетворення для трьох з'єднань, ми одержимо формули визначення опорів трикутника за відомими опорами трипроменевої зірки в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}. \end{aligned} \right\}$$

Приклад 2.6. На (рис. 2.11, а) зображена вихідна схема заміщення кола постійного струму. Вона має параметри: ЕРС джерела $E = 120\text{В}$, опори резистивних елементів у вітках кола $R_{12} = 20\text{Ом}$; $R_{13} = 30\text{Ом}$;



$R_{23} = 50\text{Ом}$; $R_{24} = 40\text{Ом}$; $R_{34} = 10\text{Ом}$. Визначити струми у всіх вітках кола.

Рис. 2.11: а) вихідна схема заміщення електричного кола;
б) еквівалентна схема перетворення із заміною опорів трикутника на трипроменеву зірку

Розв'язання.

Виходячи із заданого напрямку ЕРС джерела, вказуємо позитивні напрямки струмів у вітках кола. Напрямки струмів I_1 , I_{12} , I_{13} , I_{24} , I_{34} визначаються однозначно, напрямком струму I_{23} вказано довільно.

У заданій схемі немає послідовно або паралельно з'єднаних опорів (струмоприймачів). Проте є два трикутники опорів з вузлами: 1-2-3 і 2-4-3. Для виконання розрахунків достатньо замінити на зірку один із них.

Конкретно в схемі на (рис. 2.11, а) замінимо трикутник опорів 123 на трипроменеву зірку з опорами R_1 , R_2 , R_3 (показано пунктиром) і отримаємо схему (приведено на рис. 2.11, б).

1. Опори зірки:

$$R_1 + \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30 + 50} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_2 + \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} = \frac{20 \cdot 50}{20 + 30 + 50} = 10 \text{ Ом};$$

$$R_3 + \frac{R_{23} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} = \frac{50 \cdot 30}{20 + 30 + 50} = 15 \text{ Ом}.$$

У схемі (на рис. 2.11, б) позначимо три струми I_1 , I_{24} , I_{34} , що залишилися невизначеними, і будемо їх визначати, продовжуючи еквівалентні перетворення.

Спочатку замінимо послідовно з'єднані опори:

$$\text{у вітці між вузлами 0-2-4 } R_{024} = R_2 + R_{24} = 10 + 40 = 50 \text{ Ом};$$

$$\text{у вітці між вузлами 0-3-4 } R_{034} = R_3 + R_{34} = 15 + 10 = 25 \text{ Ом};$$

3. Еквівалентний або загальний опір схеми (рис. 2.11, б) буде:

$$R_{екв} = R_1 + \frac{R_{024} \cdot R_{034}}{R_{024} + R_{034}} = 6 + \frac{50 \cdot 25}{50 + 25} = 22,7 \text{ Ом}$$

4. Одержане значення $R_{екв}$ означає, що до джерела E підключений опір навантаження 22,7 Ом і струм, що віддає джерело, буде дорівнювати:

$$I_1 = \frac{E}{R_{екв}} = \frac{120}{22,7} = 5,3 \text{ А}$$

5. За загальним струмом I_1 достатньо просто одержати струми у вітках 2-4 і 3-4 через опори R_{24} і R_{34} (див формулу 2.13):

$$I_{24} = I_1 \frac{R_3 + R_{34}}{R_2 + R_{24} + R_3 + R_{34}} = 5,3 \frac{15 + 10}{10 + 40 + 15 + 10} = 1,77 \text{ А};$$

$$I_{34} = I_1 \frac{R_2 + R_{24}}{R_2 + R_{24} + R_3 + R_{34}} = 5,3 \frac{15 + 40}{10 + 40 + 15 + 10} = 3,53 \text{ А}.$$

6. Визначаємо різницю потенціалів між вузлами 2 і 3- U_{23} за другим законом Кірхгофа. Складаємо рівняння для контура 2-4-3-2:

$$U_{23} = I_{24} \cdot R_{24} - I_{34} \cdot R_{34} = 1,77 \cdot 40 - 3,53 \cdot 10 = 35,4 \text{ В}$$

Тоді струм у вітці 23 буде:

$$I_{23} = \frac{U_{23}}{R_{23}} = \frac{35,4}{50} = 0,706 \text{ А}$$

7. Зі знайденими трьома струмами I_{23} , I_{24} та I_{34} повернемося до вихідної схеми (на рис. 2.10, а) і тут продовжимо визначення струмів I_{12} й I_{13}

Складемо рівняння за першим законом Кірхгофа для вузла 2:

$$I_{12} - I_{23} - I_{24} = 0; \quad I_{12} = I_{23} + I_{24} = 1,77 + 0,706 = 2,48 \text{ А}; \quad I_{12} = 2,48 \text{ А}.$$

8. Аналогічно складаємо рівняння для вузла 3:

$$I_{13} + I_{23} - I_{34} = 0; \quad I_{13} = I_{34} - I_{23} = 3,53 - 0,706 = 2,82 \text{ А}; \quad I_{13} = 2,82 \text{ А}.$$

9. Перевірку розв'язання виконуємо, складаючи баланс потужності:

$$E \cdot I_1 = I_{12}^2 R_{12} + I_{13}^2 R_{13} + I_{23}^2 R_{23} + I_{24}^2 R_{24} + I_{34}^2 R_{34};$$

$$120 \cdot 5,3 = 2,48^2 \cdot 20 + 2,82^2 \cdot 30 + 0,706^2 \cdot 50 + 1,77^2 \cdot 40 + 3,53^2 \cdot 10$$

$$636 = 123 + 238,5 + 25,9 + 125 + 124,6;$$

$$636 \text{ Вт} = 636 \text{ Вт}.$$

Таким чином, баланс потужності повністю збігається.

2.4. Передача енергії постійним струмом.

В сучасних енергетичних системах виробництво, передача, розподіл та споживання електричної енергії здійснюється змінним синусоїдним струмом. Разом із тим, на промислових підприємствах існує багато технологічних процесів та електрообладнання, де без постійного струму не обійтись.

Джерелами постійного струму є генератори постійного струму та напівпровідникові випрямлячі, що перетворюють змінний струм у постійний. Це здебільшого агрегати невеликої потужності, а розподільчі мережі живлення мають обмежену довжину.

Схема лінії передачі електричної енергії постійним струмом зображена на рис. 2.12

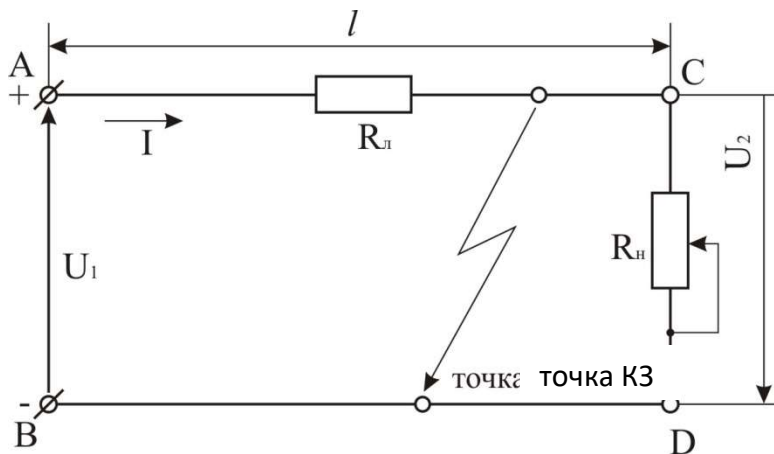


Рис. 2.12. Передача енергії постійним струмом

Нехай напруга на початку лінії АВ буде U_1 і струм у колі I . Із потужності $P_1 = U_1 I$, що надходить в мережу, частина цієї потужності $P_2 = U_2 I$ доходить до кінця (до навантаження), друга ж частина $I^2 R_\lambda$ (де $R_\lambda = \frac{2l}{\gamma S}$ – опір лінії) втрачається у проводах лінії і тоді загальна потужність P_1 , що споживається колом, буде:

$$P_1 = P_2 + I^2 R_\lambda. \quad (2.26)$$

Струм у колі залежить від зміни опору навантаження споживача R_n , що ввімкнений в кінці лінії.

$$I = \frac{U_2}{R_n} = \frac{U_1}{R_n + R_l}. \quad (2.27)$$

Зі зменшенням опору R_n струм у колі буде збільшуватися і найбільшої величини струм досягне тоді, коли R_n буде дорівнювати нулю, що відповідає так званому режиму короткого замикання (КЗ). Струм короткого замикання $I_{КЗ}$ буде:

$$I_{КЗ} = \frac{U_1}{R_l}.$$

Корисна потужність у колі буде спочатку збільшуватись, а потім зменшуватись і при короткому замиканні буде дорівнювати нулеві. Найбільша потужність в кінці схеми буде тоді, коли опір навантаження R_n за велечиною буде дорівнювати опоріві лінії R_l . У такому разі напруга в кінці лінії в точках CD буде дорівнювати половині первинної напруги:

$$U_2 = IR_n = \frac{U_1 R_n}{R_n + R_l} = \frac{U_1}{2}. \quad (2.28)$$

Якщо по лінії живлення із опором R_l повинна бути передана потужність P_2 , то коефіцієнт корисної дії передачі буде тим вище, чим більша напруга U_1 на початку лінії. Насправді: зниження U_2 при незмінній величині P_2 призведе до зменшення R_n ($R_n = \frac{U_2^2}{P_2}$). Зменшення R_n при $R_l = const$ призведе до зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД):

$$\eta = \frac{R_n}{R_l + R_n}.$$

Коефіцієнт корисної дії для будь-якого навантаження виражається через відношення потужностей споживача електричної енергії P_2 до джерела електричної енергії P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I^2 R_n}{I^2 (R_l + R_n)} = \frac{1}{1 + \frac{R_l}{R_n}}. \quad (2.29)$$

На межі, коли $R_n = \infty$, що відповідає режиму холостого ходу, $\eta = 1$; із збільшенням навантаження, тобто із зменшенням R_n , ККД зменшується. За інших рівних умов він тим вищий, чим менший опір провідів R_l .

Характер зміни потужності на початку лінії P_1 , потужності в навантаженні P_2 , коефіцієнта корисної дії η і напруги на навантаженні U_2 в функції від струму в лінії, за незмінною напругою на вході лінії U_1 , і за незмінним опором провідників ліній R_n наведені на (рис. 2.13).

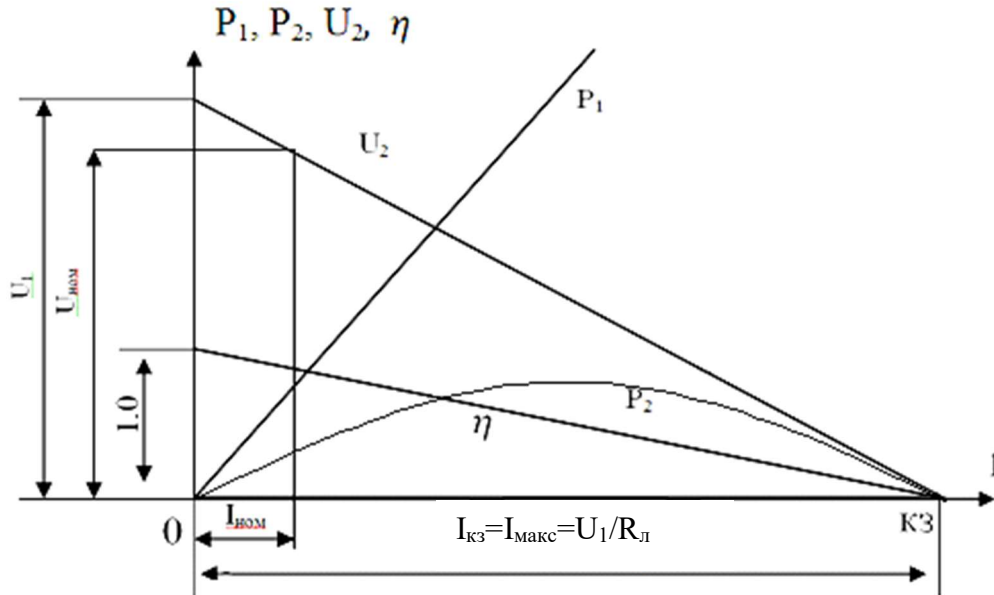


Рис. 2.13. Графіки зміни P_1 , P_2 , U_2 , і η в залежності від струму

Графіки, побудовані за рівняннями:

$$P_1 = U_1 I;$$

$$P_2 = U_1 I - I^2 R_n;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{R_n I}{U_1};$$

$$U_2 = U_1 - R_n I.$$

Приклад 2.7. Розрахувати електричну лінію постійного струму та визначити переріз S мідних проводів для передачі потужності $P_2 = 20 \text{ кВт}$ на відстань $l = 200 \text{ м}$ при напрузі в кінці лінії $U_2 = 220 \text{ В}$ за умови, щоб втрати потужності Δp , в проводах лінії не перевищували 3,5% (питома провідність міді $\gamma = 57 \text{ М/Ом} \cdot \text{мм}^2$).

Розв'язання:

1. Потужність на навантаженні:

$$I^2 R_n = 0,01 \Delta p P_2, \quad (1)$$

виконаємо перетворення формули (1) наступним чином:

$$U_2^2 I^2 R_n = 0,01 \Delta p P_2 U_2^2, \quad (2)$$

або

$$P_2^2 R_{\text{л}} = 0,01 \Delta p P_2 U_2^2, \quad (3)$$

із рівняння (3) опір проводів лінії буде:

$$R_{\text{л}} = \frac{0,01 \Delta p P_2 U_2^2}{P_2^2} \quad (4)$$

2. З іншої сторони за законом Ома опір проводів лінії:

$$R_{\text{л}} = \frac{2l}{\gamma S}, \quad (5)$$

3. Прирівнюючи рівняння 4 і 5, одержимо необхідний переріз S проводів:

$$S = \frac{2l P_2}{0,01 \Delta p \gamma U_2^2} = \frac{2 \cdot 200 \text{ м} \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{0,035 \cdot 57 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2} (220 \text{ В})^2} = 83 \text{ мм}^2.$$

За таблицями довготривалих допустимих струмів (див. додаток 2.2 табл. 2.2). Для мідних проводів із полівінілхлоридною ізоляцією, прокладених відкрито вибираємо найближчий більший переріз проводу 95 мм².

2.5. Пожежна небезпека кіл постійного струму та забезпечення їх пожежної безпеки

2.5.1. Пожежна небезпека електричних проводок

Аналіз причин пожеж, що виникають на промислових підприємствах, на електричному транспорті та на інших об'єктах, що використовують електротехнічні пристрої постійного струму, свідчать про те, що найбільшу небезпеку в пожежному відношенні викликають здебільшого силові електропроводки, прокладені до відносно потужних споживачів електроенергії і електропроводки освітлювальних мереж.

Електропроводки постійного струму, як правило, мають невелику довжину, зазвичай, прокладаються відкрито по конструкціям верстатів і іншим електротехнічним установкам, рідше по конструктивним елементам об'єктів споживачів чи будівель і споруд.

Електропроводки бувають внутрішні (всередині приміщення, будови чи споруди) та зовнішні (зовні будівель). У цьому розділі розглядаються тільки внутрішні електропроводки постійного струму напругою до 500 В.

У процесі використання електропроводок їх ізоляція підпадає під вплив ряду факторів, що призводять з часом до її природного старіння, що проявляється в зменшенні електричної та механічної міцності. Основні причини, які визивають старіння ізоляції:

- дія зовнішніх негативних факторів, особливо вологи, яка викликає поступове зволоження через у результаті проникнення вологи в ізоляцію

через нещільності і розтріскування зовнішнього шару самої ізоляції або її лакової покрівлі і через інші механічні пошкодження;

- нагрівання струмом навантаження і особливо надструмами – пусковими струмами двигунів, електричних нагрівальних печей, струмами короткого замикання і таке інше;

- перепади температур як від зміни струмів навантаження, так і зміни зовнішнього температурного поля;

- випадкові перенапруги, в тому числі від атмосферних явищ (під час грози);

- різні механічні впливи. Наприклад, вібрації проводок разом із агрегатом і спорудами, динамічні зусилля, що виникають внаслідок різких змін струмів, які визивають тріщини, зміщення і стирання ізоляції;

- постійний вплив електричних полів, за яких відбувається іонізація газових включень, неминучих в ізоляції.

Під дією перелічених та інших непрогнозованих причин ізоляція електропроводок достроково втрачає свої ізоляційні властивості і під впливом прикладеної напруги руйнується, що призводить до її пробою „на корпус” або перекриття між струмоведучими проводами і утворенню коротких замикань.

Освітлювальні електропроводки виконуються спільно зі штепсельними розетками через відповідні контактні з'єднання і відгалуження. За рахунок штепсельних розеток до освітлювальних мереж, як правило, приєднуються непрогнозовані додаткові навантаження, які нерідко перевищують розрахункові струми освітлювальної мережі. Як наслідок, виникають струмові перевантаження і додаткове нагрівання проводів до недопустимих температур, що може привести до короткого замикання в електропроводці.

Таким чином, основними винуватцями аварійних та пожежонебезпечних режимів в електропроводках є короткі замикання та струмові перевантаження.

З метою уявлення наслідків КЗ розглянемо більш докладно режим КЗ на конкретному прикладі.

На рис. 2.14 приведена схема виникнення короткого замикання в освітлювальній електропроводці.

1. Нормальний режим: при вмиканні напруги на лампу E_L потужністю $P_L = 25 \text{ Вт}$, в мережу з мідними проводами перерізом 1 мм^2 , опір всього кола буде складатися з опору двох проводів довжиною по 100 м кожний;

$$R_{np} = \frac{l}{\gamma S} = \frac{200 \text{ м}}{\frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot 1 \text{ мм}^2}} = 3,6 \text{ Ом.}$$

Загальний опір кола $R_{\text{заг}} = R_{\text{пр}} + R_L = 3,6 + 648 = 651,6 \text{ Ом}$.

Номінальний струм у колі

$$I_{\text{ном}} = \frac{U}{R_{\text{заг}}} = \frac{220}{651,6} = 0,34 \text{ А}$$

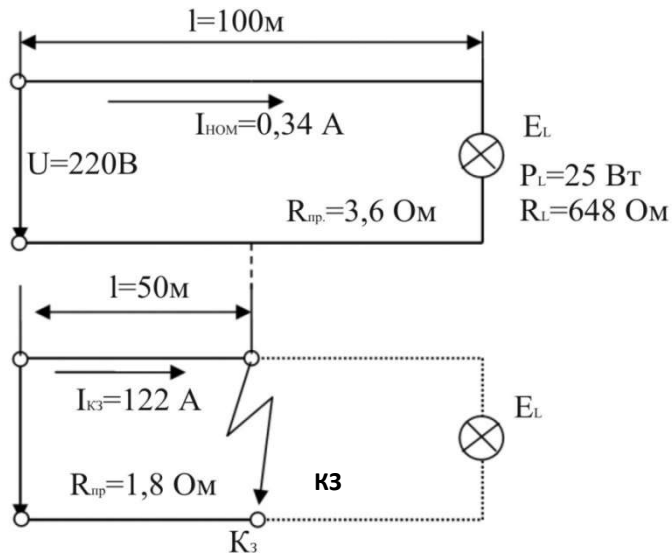


Рис. 2.14. Схема виникнення короткого замикання в мережі освітлювальної електропроводки

2. Режим короткого замикання, що стався на середині освітлювальної електропроводки – довжина лінії від джерела живлення до місця КЗ тепер буде $l = 2 \cdot 50 \text{ м} = 100 \text{ м}$ і електричний струм пройде шлях вдвічі менший. Відповідно опір цієї ділянки кола також зменшився наполовину і буде дорівнювати:

$$R_{\text{пр}(КЗ)} = \frac{R_{\text{пр}}}{2} = \frac{3,6}{2} = 1,8 \text{ Ом}$$

Струм короткого замикання:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U}{R_{\text{пр}(КЗ)}} = \frac{220}{1,8} = 122 \text{ А}$$

Величина струму в режимі короткого замикання збільшилась в $122/0,34 = 359$ разів.

Кількість теплоти, що утворюється в точці короткого замикання за 1с

$$Q_{1\text{с}} = I_{\text{КЗ}}^2 R t = 122^2 \cdot 1,8 \cdot 1 = 26791 \text{ Дж}$$

Як відомо, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ і електрична енергія, що виділяється у місці короткого замикання у вигляді дуги дорівнює $W = 26,7 \text{ кВт} \cdot \text{с}$. Ця потужність здатна утворити не тільки великі електродинамічні зусилля, а і значні температури до $4000 \text{ }^\circ\text{C}$ і більше, що призводить до миттєвого розплавлення металу провідників струму і утворенню розжарених та розплавлених частинок, які з тріском розлітаються у різні боки (як при

електрозварюванні металів) і здатні запалити будь-які горючі речовини чи предмети в навколишньому середовищі. Час дії короткого замикання залежить від сили струму та стану мережі і може сягати від одиниць до десятків секунд. Якщо миттєво апарати захисту не вимкнуть таку ділянку мережі, то неминуче настає розплавлення та термічне руйнування ізоляції проводів по всій довжині електропроводки від місця КЗ до джерела живлення. В більшості випадків це призводить до загоряння горючої ізоляції або ж займистого навколишнього середовища.

Отже цілком очевидно, що короткі замикання є найхарактернішою причиною виникнення пожеж від електропроводок.

Надмірне нагрівання електропроводок може також виникнути через струмове перевантаження, тобто при протіканні величини струму більшого за допустимий розрахунковий струм.

Велику пожежну небезпеку викликають перехідні опори, що виникають в місцях неякісного з'єднання (послаблення) контакту струмоведаючих проводів чи конструктивних елементів електричного кола. Контактні з'єднання (особливо контакт мідь-алюміній) з часом під впливом природних факторів втрачають якісний контакт і тоді починається іскріння в контакті і локальне нагрівання як струмоведаючих, так і конструктивних елементів електричного кола, що нерідко закінчується або аварією, або пожежею.

2.5.2. Заходи щодо попередження аварій і пожеж в колах постійного струму

Основним показником надійності роботи та пожежної безпеки кіл постійного струму є стан ізоляції струмоведаючих ізольованих провідників.

Стан ізоляції оцінюється за нормами, приписаними діючими електротехнічними правилами і стандартами.

У всіх випадках як з точки зору пожежної безпеки, так і з точки зору надійності роботи необхідно підтримувати ізоляцію мереж на високому рівні.

Правила улаштування електроустановок [6] вимагають, щоб у мережах напругою до 1000 В опір ізоляції мережі на ділянці між двома суміжними запобіжниками або за останніми запобіжниками між будь-яким проводом і землею, а також між двома будь-якими проводами був би не меншим ніж 0,5 МОм.

Опір ізоляції в машинах постійного струму між обмотками і кожної обмотки відносно корпусу при температурі 10-30 °С також повинен бути не менше 0,5 МОм.

Цілком очевидно, що ці вимоги не можуть бути виконані без систематичного і ефективного контролю за станом ізоляції.

Вимірювання опору ізоляції проводиться мегаомметром на напругу 500 і 1000 В, наприклад типу М1101.

Випробування кабелів напругою більше 1000 В виконується мегаомметром на напругу 1000-2500 В. Тривалість випробування – 1 хв.

«Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» [20] визначені нормативи випробування електричних мереж, що знаходяться в експлуатації. Водночас передбачені випробування при капітальних ремонтах електрообладнання (К), випробування при поточних ремонтах (Т) і міжремонтні випробування (М), тобто профілактичні випробування не пов'язані з виводом обладнання в ремонт.

Вимірювання опору ізоляції виконується при знятих плавких вставках; при цьому:

- в силових колах повинні бути виключені електроприймачі, а також апарати, прилади й інші елементи кола;

- в освітлювальних колах лампи повинні бути викручені, а штепсельні розетки, вимикачі і групові щитки – приєднані.

Капітальний ремонт електрообладнання проводиться не рідше 1 разу на 3 роки, а поточний ремонт і міжремонтне обслуговування – в терміни, установлені відповідальним за електрогосподарство, зважаючи на місцеві умови.

В таблиці 2.1 визначені види випробувань і норми для силових, освітлювальних проводок і кабельних ліній до 1000 В.

Таблиця 2.1

Види і норми випробувань

Види випробування	Найменування випробування	Норми випробування	Примітка
К, Т, М	Вимірювання опору ізоляції	Не менше 0,5 МОм	Проводиться за нормами як для знову впроваджувального електрообладнання
К	Випробування підвищеною напругою промислової частоти (на протягом 1хв.)	1000 В	Може бути замінено вимірюванням мегаомметром на напругу 2500 В

Другим, не менш важливим заходом щодо запобігання аварійних режимів при експлуатації мереж і електричних машин (коротких замикань, перевантажень і тощо), за винятком спеціального електрообладнання, використовують здебільшого апарати захисту – плавкі запобіжники і автоматичні вимикачі (автомати). Відразу відмітимо, що пристрої захисту не в змозі запобігти появі коротких замикань, ці пристрої призначені тільки для своєчасного вимикання КЗ та тривалих перевантажень. Засоби,

що забезпечують збереження установки, безпеку обслуговування і попередження пожеж апарати захисту через неправильний монтаж і експлуатацію самі можуть стати причиною пожежі або вибуху.

Найбільш розповсюдженими апаратами захисту є плавкі запобіжники, а їх основними запобіжними конструктивними елементами є плавка вставка.

Матеріалом для плавких вставок слугує свинець, сплав свинцю з оловом, цинк, алюміній, мідь, срібло і деякі інші матеріали. Досвід експлуатації показав, що найбільш практичними вставками є вставки із тугоплавких металів: міді і срібла. На практиці найчастіше використовуються більш дешевші вставки із міді. Проте при струмах, найближчих до номінальних струмів плавкої вставки, вони нагріваються до температури 850...900 °С, що призводить до перегрівання контактів і корпусу запобіжника, що також є пожежно небезпечними.

Велике значення, з точки зору попередження пожеж, має правильний вибір номінального струму спрацювання плавкої вставки. Якщо плавка вставка запобіжника обрана правильно, то вимикання небезпечних струмів відбудеться раніше, ніж вони встигнуть утворити в захисному колі небезпечні наслідки.

Аналогічним чином, якщо електрична мережа чи електроустановка захищається автоматичним вимикачем, то також повинні бути правильно обрані номінальні струми спрацювання електромагнітного (від КЗ) та теплового (від перевантаження) розчіплювачів. Поріг спрацювання апаратів захисту повинен відповідати струмам короткого замикання на початку ділянки кола, яка захищається. Водночас на кожному апараті повинні бути вказані: його номінальний струм, величина уставки розчіплювача чи номінальний струм плавкої вставки. Ні в якому разі не можна використовувати некалібровані (нестандартні) вставки.

Приводимо величини струмів плавлення для мідних провідників:

Діаметр проводу, мм	0,05	0,08	0,11	0,15	0,23	0,25
Струм плавлення, А	1,3	2,2	3	4,5	7	10

Для більш товстих провідників струм плавлення можна розрахувати за формулою:

$$I_{пл} = m\sqrt{d^3},$$

де d – діаметр провідника, мм.

m – коефіцієнт: для міді – 80; алюмінію – 59,2; заліза – 24,6; олова – 12,8; свинцю – 10,8.

У випадку захисту електричних мереж і двигунів, апарати захисту встановлюють на всіх полюсах, в провіднику заземлення захисні апарати не встановлюються.

Не можна встановлювати апарати захисту і в місцях приєднання до лінії живлення таких кіл: управління, сигналізації і вимірювання, вимикання яких може призвести до небезпечних наслідків (кола пожежних насосів, вентиляторів, що запобігають утворенню вибухонебезпечних концентрацій). Провідники таких кіл повинні бути прокладені в трубах або мати захисну негорючу оболонку.

Для електродвигунів слід передбачати захист від коротких замикань, а в окремих випадках від струмового перевантаження і мінімальної напруги, крім того, двигуни постійного струму (з послідовним збудженням) захищають від надмірного перевищення частоти обертання.

Взагалі вибір виду захисту електричного кола і підбір апаратів і запобіжників проводиться у відповідності з вимогами ПУЕ [7, Гл.3.1]. Установка апаратів захисту у вибухонебезпечних зонах категорично забороняється, а в пожежонебезпечних зонах (в залежності від класу) їх розташовують в закритих (ущільнених) або захищеного виконання електрошафах.

Велике значення для запобігання аварійних ситуацій і виникнення пожеж у виробництві має система технічного обслуговування і ремонту устаткування енергогосподарств промислових підприємств (система ТОР ЕО) [22].

Система ТОР ЕО – система так званого планово-попереджувального типу, сутність якої заключається у тому, що після відпрацювання електрообладнання і мережами відповідної кількості часу в момент очікуваного відказу здійснюються різного виду ремонтні дії (технічне обслуговування, поточний, середній або капітальний ремонт), чергування і періодичність яких визначаються призначенням агрегату (мережі) його конструктивними особливостями, (виконанням) та умовами експлуатації і станом навколишнього середовища. А основними для виконання є річний графік ТОР ЕО.

Система ТОР ЕО попереджує прогресуюче зношення обладнання, усуває можливість випадкового виходу його із ладу, сприяє усуненню умов, які можуть привести до пожежі.

Роботи з технічного обслуговування електрообладнання складаються з міжремонтного нагляду і профілактичних випробувань. Міжремонтний нагляд планується як самостійна операція і утримує постійне спостереження за виконанням вимог, вказаних в технічних керівних документах заводів-виробників, “Правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів“ (ПБЕ). До того ж того міжремонтне обслуговування передбачає своєчасне усунення незначних несправностей,

зокрема ліквідація послаблених контактних з'єднань, регулювання обладнання і апаратури тощо.

Для міжремонтного нагляду за роботою електричних машин перевіряють стан контактуючих частин (щітки - колектора), чистоту станини та вентиляційних каналів, температуру корпусу та підшипникових вузлів.

Граничнодопустиме нагрівання кожної із частин електричної машини залежить від нагрівостійкості їх ізоляції.

У сучасних умовах в електромашинобудуванні застосовуються, головним чином ізоляційні матеріали класів за нагрівостійкістю Е, В і F. Матеріали класу Н застосовуються значно рідше.

У таблиці 2.2 наведені допустимі температури класів нагрівостійкості електроізолюючих матеріалів, що використовуються в обмотках та конструкціях електричних машин.

Таблиця 2.2

Допустимі температури класів нагрівостійкості деяких ізолюючих матеріалів

Клас нагріво- стійкості електроізолюючих матеріалів	Температура °С		
	Гранично допустима для матеріалу ізоляція	Середня допустима для обмоток	Допустиме перевищення температури зовнішнього середовища (25 °С)
Е	120	100	60
В	130	110	70
F	155	125	85
Н	180	140	100

2.5.3. Акумулятори та акумуляторні установки

Під час експлуатації акумуляторів і акумуляторних батарей треба пам'ятати, що всі кислотні акумулятори в процесі роботи виділяють водень. Він утворює вибухонебезпечну суміш з повітрям, тому необхідно запобігати вірогідності контакту акумулятора з відкритим вогнем.

Згідно з ПУЕ (4.4.2 і 4.4.30) приміщення акумуляторних батарей, в яких відбувається зарядження акумуляторів при напрузі більше 2,3 В на елемент, відносяться до вибухонебезпечних зон класу В-Ia (за ПБЕ – 2001р.[5] – зона класу 2).

Приміщення акумуляторних батарей, що працюють в режимах постійного підзаряду і заряду з напругою до 2,3 В на елемент є вибухонебезпечними тільки в період формування батарей і заряджання після їх ремонту з напругою до 2,3В на елемент. В умовах нормальної

експлуатації з напругою до $2,3\text{ В}$ на елемент ці приміщення не вважаються вибухонебезпечними (4.4.2, ПУЕ).

Для акумуляторної батареї необхідно передбачати блокування, що не допускає зарядження батареї з напругою більше $2,3\text{ В}$ на елемент за умови відключеної вентиляції.

Приміщення, де змонтовані стаціонарні установки кислотних акумуляторних батарей, повинні відповідати вимогам (Розділу 4.4 ПУЕ). Приміщення акумуляторних батарей, в яких відбувається заряд акумуляторів при напрузі більше $2,3\text{ В}$ на елемент, повинні бути обладнані стаціонарною примусовою припливно-витяжною вентиляцією. Крім того, для вентиляції приміщень акумуляторних батарей повинна бути забезпечена природна вентиляція, яка повинна забезпечити не менше, ніж однократний обмін повітря за годину. У тих випадках, коли природна вентиляція не може забезпечити потрібну кратність обміну повітря, необхідно використовувати примусову витяжну вентиляція.

Запитання та завдання для самоконтролю.

1. Наведіть схему нерозгалуженого електричного кола постійного струму з послідовним з'єднанням опорів і одним джерелом енергії, зробіть аналіз режиму роботи джерела в такій схемі.

2. Охарактеризуйте переваги і недоліки кіл з послідовним з'єднанням опорів.

3. Наведіть приклад (схему) розгалуженого електричного кола з паралельним з'єднанням опорів та проведіть аналіз роботи такого кола.

4. Як розраховується еквівалентний опір при послідовному, паралельному та мішаному з'єднанні опорів?

5. Сформулюйте перший та другий закон Кірхгофа. Наведіть приклади практичного їх використання.

6. Назвіть основні методи розрахунків (аналізу) електричних кіл постійного струму. Наведіть приклади.

7. Обґрунтуйте сучасний рівень отримання, передачі та розподілу електроенергії постійного струму.

8. Поясніть можливі режими роботи та пожежну небезпеку електричних кіл постійного струму.

9. Опір провідника визначається за законом Ома (за допомогою вольтметра та амперметра) має значення R . Який буде опір цього провідника, якщо прикладена до його кінців напруга буде дорівнювати нулю?

ДОДАТКИ 2

Таблиця Д. 2.1

Тривало допустимі сили струму для проводів і шнурів з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією і алюмінієвими жилами

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм	Сили струму А, для проводів, прокладених					
	відкрито	в одній трубі				
		двох одно-жильних	трьох одно-жильних	чотирьох одно-жильних	одного двох-жильного	одного три-жильного
2	21	19	18	15	17	14
2,5	24	20	19	19	16	16
3	27	24	22	21	22	18
4	32	28	28	23	25	21
5	36	32	30	27	28	24
6	39	36	32	30	31	26
8	46	43	40	37	38	32
10	60	50	47	39	42	38
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	255	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190

Таблиця Д. 2.2

Тривало допустимі сили струму для проводів і шнурів з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією і мідними жилами

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм ²	Сили струму А, для проводів, прокладених					
	відкрито	в одній трубі				
		двох одно-жильних	трьох одно-жильних	чотирьох одно-жильних	одного двох-жильного	одного три-жильного
0,5	11	-	-	-	-	-
0,75	15	-	-	-	-	-
1	17	16	15	14	15	14
1,2	20	18	16	15	16	14,5
1,5	23	19	17	16	18	15
2	26	24	22	20	23	19
2,5	30	27	25	25	25	21
3	34	32	28	26	28	24
4	41	38	35	30	32	27
5	46	42	39	34	37	31
6	50	46	42	40	40	34
8	62	54	51	46	48	43
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250

Таблиця Д. 2.3

Тривало допустимі сили струму для проводів з мідними жилами і гумовою ізоляцією в металевих захисних оболонках та кабелів з мідними жилами і гумовою ізоляцією в свинцевій, полівінілхлоридній, нейритовій або гумовій оболонці, броньованих і неброньованих

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм ²	Сили струму *, А, для проводів і кабелів				
	одно-жильних	двожильних		трижильних	
		при прокладанні			
	відкрито	відкрито	в землі	відкрито	в землі
1,5	23	19	33	19	27
2,5	30	27	44	25	38
4	41	38	55	35	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	180
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385

Таблиця Д. 2.4

Тривало допустимі сили струму для кабелів з алюмінієвими жилами і гумовою або пластмасовою ізоляцією в свинцевій, полівінілхлоридній, та гумовій оболонках, броньованих і неброньованих

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм ²	Сили струму *, А, для проводів і кабелів				
	одножильних	при прокладанні			
		двожильних		трижильних	
		відкрито	в землі	відкрито	в землі
2,5	23	21	34	19	29
4	31	29	42	27	38
6	38	38	55	32	46
10	60	55	80	42	70
16	75	70	105	60	90
25	105	90	135	75	115
35	130	105	160	90	140
50	165	135	205	110	175
70	210	165	245	140	210
95	250	200	295	170	255
120	295	230	340	200	295

РОЗДІЛ 3. МАГНІТНЕ ПОЛЕ І МАГНІТНЕ КОЛО

3.1. Магнітні явища та характеристики магнітного поля

Історія пізнання і освоєння електромагнітних явищ триває і нині.

У 1600 році англійський лікар-фізик Уільям Гільберт досліджував властивості магнітної стрілки і прийшов до висновку, що земна куля - це магніт, тобто було відкрите магнітне поле Землі. Незважаючи на багато щодо гіпотез походження цього явища, істинного пояснення виникнення й існування магнітного поля Землі й інших планет сонячної системи сьогодні неіснує. Є припущення, що Земля обертаючись зі швидкістю 465,76 м/с (на екваторі) навколо розжареного рідкого ядра, якимось чином нерухомого, за рахунок швидкісного обертання і тертя з ядром утворює магнітне поле (Земля обертається навколо своєї вісі як підшипник, але це ж тільки припущення).

Магнітне поле Землі, яке заставляє відхилитися стрілку компаса, дорівнює 1 Гаусу ($1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$). У лабораторіях на Землі можна створити магнітне поле 1000000 Гаус. В космічному просторі існують так звані, магнітори магнітне поле яких досягає 10^{15} Гс . Магніт такої сили, якби він був розташований на половинній відстані від Землі до Місяця, дуже легко міг би стерти інформацію з кредитної картки і притягнути до себе ручку із нашої кишені.

Взагалі у всесвіті важливу роль займають електромагнітні процеси в зокрема і у Сонячній системі. Магнітне поле, як вода, повітря, сонячне світло – одне із обов'язкових умов існування життя: без цих, нами небачених потоків, життя перестає існувати.

Нам відомо, що магнітне поле існує навкруги провідників зі струмом. В звичайних умовах у провіднику струм може підтримуватися тільки за рахунок дії джерела живлення, так як електрони, що рухаються в провіднику гальмуються при взаємодії з іонною решіткою металу.

Зовсім інші обставини в космічній плазмі, де зіткнення між частками, що рухаються, можуть відбуватися дуже рідко. В результаті струми, що виникли з якоїсь причини, можуть існувати досить довго. І скільки ж часу навкруги них буде існувати магнітне поле.

Потоки такої намагніченої плазми постійно надходять від нашого світила (сонця). Але при підході до землі її зустрічає земляна магнітосфера, яка захищає мешканців нашої планети від смертельних випромінювань.

У всіх планет земляної групи (окрім самої землі), а також у супутників планет, в тому числі і у Місяця, практично магнітного поля немає. Це достовірно удалось встановити за допомогою космічних апаратів, що пролітали поблизу цих небесних тіл, а також за допомогою приладів, що встановлені на поверхні Місяця, Венери і Марса.

Так, магнітне поле на поверхні Венери в 10 тисяч раз слабкіше ніж на поверхні Землі, на поверхні Місяця і Марса дещо сильніше, ніж на Венері, але набагато менше, ніж на Землі.

Через слабкості магнітних полів у всіх планет земної групи (за виключенням самої Землі) у супутників планет немає радіаційних поясів; заряджені космічні частки легко попадають на їх поверхню. Тому там неможливе існування живих організмів.

На відміну від планет земляної групи планети-гіганти оточені значною магнітосферою. Це можна пояснити за рахунок їх швидкого обертання навколо своєї осі – вдвічі швидкше, ніж обертається Земля, а також можна припустити, що в їх надрах знаходиться потужне рідкометалеве ядро з гарною електропровідністю.

Найсильніше (на порядок вище, ніж на Землі) магнітне поле у Юпітера. Астрономи в атмосфері Юпітера спостерігали полярне сяйво і потужні блискавки.

На землі нас оточують як природні магнітні явища, так і штучні створені людиною. Завдяки їх використанню величезний розвиток одержали радіомовлення і радіотелефонія, телебачення й інтернет, навігаційно – супутникові системи зв'язку і радіоуправління космічними апаратами і багато іншого корисного в сучасному світі.

Сучасний розвиток електромеханіки став можливим завдяки відкриттю у 1820 році датським фізиком Ерстедом Ханс Крістіаном явища відхилення магнітної стрілки поблизу провідника, через який проходить електричний струм. Це відкриття було поштовхом до створення англійським вченим Майклом Фарадеєм пристрою, який показує можливість руху провідника зі струмом навколо магнітного поля. Таким чином, було доказано, що провідник утворює електромагнітне поле. Сьогодні час це явище широко використовується в електроенергетиці і в електромеханіці. За законом електромагнітної індукції, відкритим М. Фарадеєм, працюють всі генератори в світі, що виробляють електричну енергію. Перетворення електричної енергії на механічну також відбувається електродвигунами, що працюють за принципом закону електромагнітної індукції. Розподіл електричної енергії у мережах електропостачання виконується за допомогою електромагнітних пристроїв – трансформаторів, в яких з використанням енергії магнітного поля можна отримати різні рівні напруги для споживачів від одиниць до десятків тисяч вольт. Електромагнітні пристрої та прилади використовуються в системах керування електроприводами, в автоматичній і телемеханіці, у вимірювальній, контролюючій та регулювальній апаратурі. Навіть у кожному автомобілі використовується для підзаряджання акумуляторної батареї під час руху автомобіля електромагнітний генератор постійного струму.

Отже, можна з впевненістю сказати, що штучні та природні магнітні поля та електромагнітні пристрої приводять в активний рух весь світ.

Більш докладно розглянемо штучні магнітні поля, які мають найбільш практичне значення.

Дія електричного струму при проходженні його через провідник проявляється не тільки у самому провіднику, але й у просторі, що оточує провідник. Так наприклад, якщо поблизу котушки зі струмом, яка утримує певну кількість витків дроту, помістити сталий магніт, то він буде під впливом дії електромагнітної сили і відштовхуватись від котушки або притягуватися до неї. Якщо поблизу нерухомого провідника зі струмом помістити паралельно другий провідник, по якому протікає струм, то другий провідник буде притягуватися до нерухомого провідника або відштовхуватись від нього залежно від напрямків струмів. Явища, що виникають навколо провідника зі струмом, аналогічні явищам, що виникають навколо природних магнітів, тому їх називають магнітними явищами струму, а сили, які діють у просторі, що оточує провідник зі струмом, магнітними силами.

Простір навколо провідника зі струмом, у якому діють магнітні сили, називається магнітним полем струму.

Отже, магнітне поле у всіх без винятку випадках утворюється рухомими зарядами або струмами. Магнітне поле і струм завжди існують одночасно і невід'ємні один від одного. Магнітне поле, як і електричне, характеризується лініями поля. Стальні ошурки в магнітному полі розташовуються вздовж ліній, які називають магнітними силовими лініями. Тому графічно магнітне поле зображується за допомогою магнітних ліній, які завжди замкнені. За напрям магнітних ліній у замкненому просторі умовно приймають напрям від північного полюса (N) до південного (S).



Перші ґрунтовні експериментальні дослідження електричних і магнітних явищ належать англійському лікарю-фізику **Уільяму Гільберту (24.05.1544 – 30.11.1603)** У. Гільберт – англійський лікар-фізик. Одержав освіту в Кембриджі та Оксфорді. Був лікарем при дворі королеви Англії Єлизавети Тюдор (1558-1603). У 1600 р. опублікував твір «Про магніт, магнітних тілах і великому магніті – землі...» в якому описав свої дослідження (більш ніж 600 дослідів) магнітних і електричних явищ і побудував перші теорії щодо електрики і магнетизму. Встановив, що

магніт завжди має два полюси – північний і південний, і розпилюючи магніт, ніколи неможливо одержати магніт тільки з одним полюсом; що однойменні полюси відштовхуються, а різнойменні притягуються; що залізні предмети під впливом магніту набувають магнітних властивостей

(намагнічуються); виявив явище підсилення природного магнетизму за допомогою залізної арматури.

У. Гільберт є основоположником науки про електрику. Віддаючи належне янтарю, першому матеріалу, на якому спостерігалась електризація, він називає її електричною, поклавши в основу грецьку назву янтарю – електрон. Отже, слово «електрика» введено в життя за пропозицією лікаря на основі досліджень, що стали історичними, які й поклали початок розвитку електротехніки.

Минуло майже п'ять століть, з того часу коли У. Гільберт відкрив магнітне поле Землі, але й до сього часу походження магнітного поля Землі залишається загадкою для вчених, хоча існує багато гіпотез щодо пояснення цього феномена.

3.2. Електрика із магніта

Як відомо, коли через провідник протікає струм, то навколо такого провідника утворюється слабе магнітне поле. Поле буде підсилюватися, якщо провідник зі струмом намотати на котушку з відповідною кількістю витків w . Отже, постійне магнітне поле може бути отримане від постійного струму, тобто практично від електрики. Металеве осердя всередині котушки концентрує магнітне поле ще сильніше, а тому в багатьох електромагнітних пристроях магнітне поле отримують з використанням феромагнітних матеріалів.

Котушки при густій намотці дроту зі струмом і достатній її довжині утворюють постійне магнітне поле, силові магнітні лінії якого всередині котушки мають напрямок вздовж її осі (рис. 3.1) і замикаються зовні котушки. Такі котушки називаються електричними магнітами або просто електромагнітами і широко використовуються на практиці в електромагнітних пристроях і механізмах.

Постійне магнітне поле може бути отримане від природних та штучних сталих магнітів.

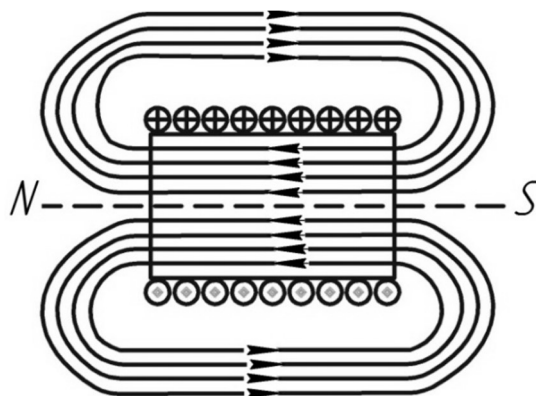


Рис. 3.1. Магнітне поле струму циліндричної котушки

Здатність котушок збуджувати магнітне поле характеризується **магніторушійною силою (МРС)**, що позначається буквою F_M і дорівнює добутку величини струму I на кількість витків котушки w .

$$F_M = I \cdot w. \quad (3.1)$$

Із формули (3.1) випливає, що МРС – скалярна величина. В міжнародній системі одиниць СІ вона вимірюється, як і величина струму, в амперах (А).

На практиці іноді одиницю вимірювання МРС виражають в ампервитках (А·в).

В системі одиниць СГС (сантиметр, грам, секунда) МРС вимірюється в одиницях – гільбертах, $1\text{Гб}=10/4\pi \text{ А}=0,795775 \text{ А} \approx 0,8 \text{ А}$

3.3. Основні величини, що характеризують магнітне поле

3.3.1. Магнітна індукція

Якщо у зовнішнє магнітне поле перпендикулярно до його магнітних ліній помістити провідник зі струмом, то внаслідок взаємодії зовнішнього поля і магнітного поля провідника зі струмом виникає електромагнітна сила F_{em} , яка спричиняє переміщення провідника у магнітному полі, тобто виштовхує провідник зі струмом за межі поля. Для визначення напрямку сили, що діє на вміщений в магнітне поле провідник зі струмом, застосовується правило лівої руки.

Якщо розмістити ліву руку так, щоб магнітні лінії входили в долоню, а чотири витягнуті пальці показували напрям струму, то відігнутий великий палець покаже напрям руху провідника.

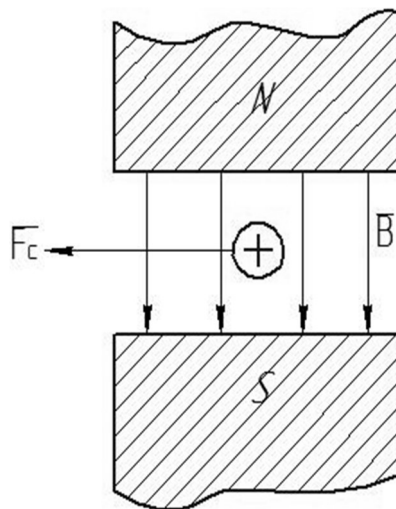


Рис. 3.2. Провідник зі струмом у магнітному полі

Величина сили, що діє на провідник зі струмом, вміщений у магнітне поле, пропорційна активній довжині провідника l (частині

провідника, що знаходиться в магнітному полі), струмові I у провіднику та магнітній індукції \vec{B} .

$$F_{em} = I \cdot \vec{B} \cdot l. \quad (3.2)$$

З формули (3.2) можна визначити магнітну індукцію \vec{B} ,

$$\vec{B} = \frac{F_{em}}{I \cdot l}, \quad (3.3)$$

де F_{em} – величина електромагнітної сили, H – ньютон; I – сила струму, А; l – активна довжина провідника, м.

Магнітна індукція є векторна величина і характеризує інтенсивність і напрямок магнітного поля.

Якщо у формулі (3.3) струм дорівнює одному амперу, а довжина провідника l дорівнює одному метру, то величина магнітної індукції \vec{B} чисельно дорівнює силі, з якою діє магнітне поле на провідник довжиною один метр при струмі в ньому один ампер.

Отже, якщо $F_{em} = 1H$; $I = 1A$; $l = 1m$, можна визначити одиницю вимірювання магнітної індукції:

$$[B] = 1 \frac{H}{A \cdot m} = 1 \frac{H \cdot m}{A \cdot m^2} = 1 \frac{Дж}{A \cdot m^2} = 1 \frac{A \cdot B \cdot c}{A \cdot m^2} = 1 \frac{B \cdot c}{m^2} = 1 \frac{Вб}{m^2} = 1Тл.$$

Таким чином, у міжнародній системі одиниць вимірювання СІ магнітна індукція вимірюється у вольт-секундах на квадратний метр.

Ця одиниця називається **тесла** ($Тл$).

Найменування «тесла» одиниці магнітної індукції присвоєно на честь югославського винахідника в області електро і радіо техніки М. Тесла (1856 – 1943).

Крім одиниці тесла, магнітна індукція вимірюється у гаусах: $1Гс = 10^{-4} Тл$, або $1Тл = 10^4 Гс$.

Найменування «Гаус» присвоєно на честь німецького математика і фізика К.Ф. Гауса (1777 – 1855).

Для прямолінійного проводу (рис.3.3) індукція \vec{B} у точці n зовні проводу дорівнює

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot I}{r}, \quad (3.4)$$

де

r – відстань точки n від вісі провідника, м;

μ_0 - магнітна постійна, $\mu_0 = \frac{4\pi Ом \cdot c}{10^7 м}$;

I – струм, А.

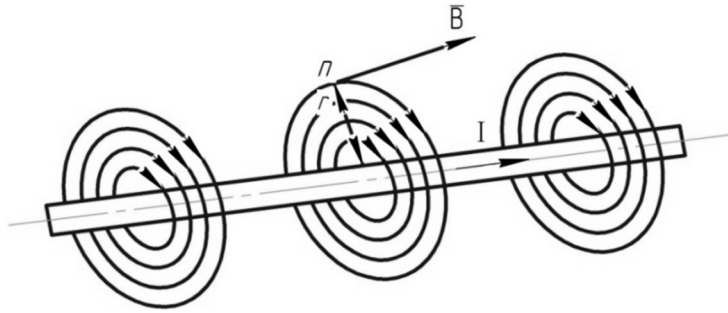


Рис. 3.3. Магнітні силові лінії провідника зі струмом

Отже, вектор магнітної індукції \vec{B} визначає силу, що діє на рухомий в магнітному полі електричний заряд, і має напрямок по дотичній до магнітної сигової лінії, що проходить через точку, в якій визначається вектор магнітної індукції. Тобто \vec{B} – силова характеристика магнітного поля.

Поле називається однорідним, якщо у всіх точках поля вектор індукції однаковий ($\vec{B} = const$). Прикладом однорідного поля може слугувати поле всередині циліндричної котушки (рис. 3.1).

3.3.2. Магнітний потік, напруженість магнітного поля, магнітна проникність

Загальна кількість магнітних ліній, які проходять через дану площину, називається магнітним потоком:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}, \quad (3.5)$$

де \vec{B} - вектор магнітної індукції, Тл

S - площа, через яку проходять магнітні силові лінії, m^2 .

Магнітний потік вектора магнітної індукції Φ – скалярна величина.

Оскільки магнітна індукція \vec{B} вимірюється у $B \cdot c / m^2$, а площа S – у m^2 , то магнітний потік вимірюється в вольт-секундах, або веберах (Вб).

$$[\Phi] = 1 \frac{B \cdot c}{m^2} \cdot 1m^2 = 1B \cdot c = 1Вб.$$

Вебер являє собою магнітний потік, при зміні якого зі швидкістю в 1 вебер протягом 1с у колі індукується електрорушійна сила в 1В.

Магнітний потік для електродвигунів з масивними осердями зазвичай виражають в мілівеберах ($1млВб = 1 \cdot 10^{-3} Вб$), а для постійних магнітів і електричних приладів – в мікровеберах ($1мкВб = 1 \cdot 10^{-6} Вб$).

Найменування одиниці магнітного потоку «вебер» присвоєна на честь німецького фізика В.Е. Вебера (1804 – 1891).

Магнітний потік вимірюється також у максвеллах (Мкс):

$$1Мкс = 10^{-8} Вб.$$

Найменування «максвел» присвоєно на честь англійського фізика Д.В. Максвела (183 –1879).

Для характеристики магнітного поля, крім магнітного потоку і магнітної індукції, застосовуються ще напруженість \vec{H} магнітного поля і магнітна проникність μ , мі.

Напруженість магнітного поля \vec{H} – величина векторна. Вектор напруженості магнітного поля має однаковий напрям з вектором магнітної індукції. Напруженість магнітного поля – це величина, яка враховує вплив сил струму і форми провідника на інтенсивність (густину) магнітних ліній і не залежить від властивостей середовища. Так, наприклад, якщо провідник прямолінійний і через нього протікає струм I , то інтенсивність магнітних ліній на будь-якій відстані буде менша, ніж інтенсивність магнітних ліній на тій самій відстані всередині котушки, виготовленої з такого самого провідника при тому самому струмі. Напруженість магнітного поля всередині котушки на її осі (рис.3.4) можна визначити за формулою:

$$H = \frac{I \cdot w}{l}, \quad (3.6)$$

де H – напруженість магнітного поля, А/м;

I – сила струму, А;

w – кількість витків котушки;

l – довжина котушки, м.

Одиниця напруженості магнітного поля – ампер на метр:

$$[H] = \frac{1A}{1m} = 1 \frac{A}{m}$$

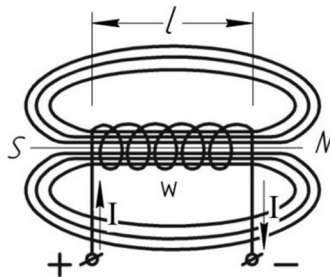


Рис 3.4. Напруженість магнітного поля всередині котушки

Дослідами встановлено, що інтенсивність магнітного поля залежить також і від властивостей середовища, в якому створюється магнітне поле.

Величина, що характеризує магнітні властивості середовища, називається абсолютною магнітною проникністю:

$$\mu_a = \frac{\bar{B}}{H}. \quad (3.7)$$

Знайдемо одиницю вимірювання абсолютної магнітної проникності:

$$[\mu_a] = \frac{B \cdot c \cdot m}{m^2 \cdot A} = \frac{Om \cdot c}{m}.$$

Отже, одиницею магнітної проникності є Ом-секунда на метр. Абсолютну магнітну проникність матеріалів виражають як добуток:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \quad (3.8)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна постійна, Гн/м; Генрі = $\frac{\text{вольт} \cdot \text{секунда}}{\text{ампер}}$, що характеризує магнітні властивості вакуума;

$$\mu = \frac{4 \cdot \pi}{10^7} \frac{Om \cdot c}{m} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{B \cdot c}{A \cdot m} = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{B \cdot c}{A \cdot m}, \quad (3.9)$$

μ - відносна магнітна проникність, абстрактне число, яке показує, у скільки разів магнітне поле даної речовини (магнетика) більше магнітного поля в вакуумі при тій же напруженості.

Враховуючи вираз (3.7), маємо:

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \mu_a \cdot \bar{H} \\ \bar{H} &= \frac{\bar{B}}{\mu_a} = \frac{\bar{B}}{\mu_0 \cdot \mu}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Залежно від значення магнітної проникності всі матеріали розділяються на такі групи:

- матеріали, у яких $\mu < 1$ називаються діамагнітними (мідь, алюміній, цинк, срібло, нержавіюча сталь тощо);
- матеріали, у яких $\mu > 1$, називаються парамагнітними (повітря, платина тощо);
- особливу групу утворюють матеріали, у яких магнітна проникність може досягнути десятків і сотень тисяч; разом із тим вона не є постійною величиною. Такі матеріали називаються феромагнітними.

До феромагнітних матеріалів відносяться електротехнічна сталь, технічно чисте залізо (низьковуглецева сталь), пермалой, пермендюр (сплави заліза з нікелем, ванадієм та іншими елементами). Використання того чи іншого матеріалу залежить від його призначення, умов роботи і вимог до нього. Найбільш розповсюдженим матеріалом є електротехнічна

сталь, виробництво якої складає приблизно 95 % усіх феромагнітних матеріалів. Вона використовується в магнітопроводах електричних машин усіх типів, трансформаторах, електромагнітних механізмах всіх систем, силовій комутаційній апаратурі тощо.

3.3.3. Магнітна напруга

Розглянемо просте магнітне коло наведене на рис.3.5. Воно утримує: магніто-провід – стальне осердя, котушку збудження з кількістю витків w , а також повітряний проміжок Δl_n .

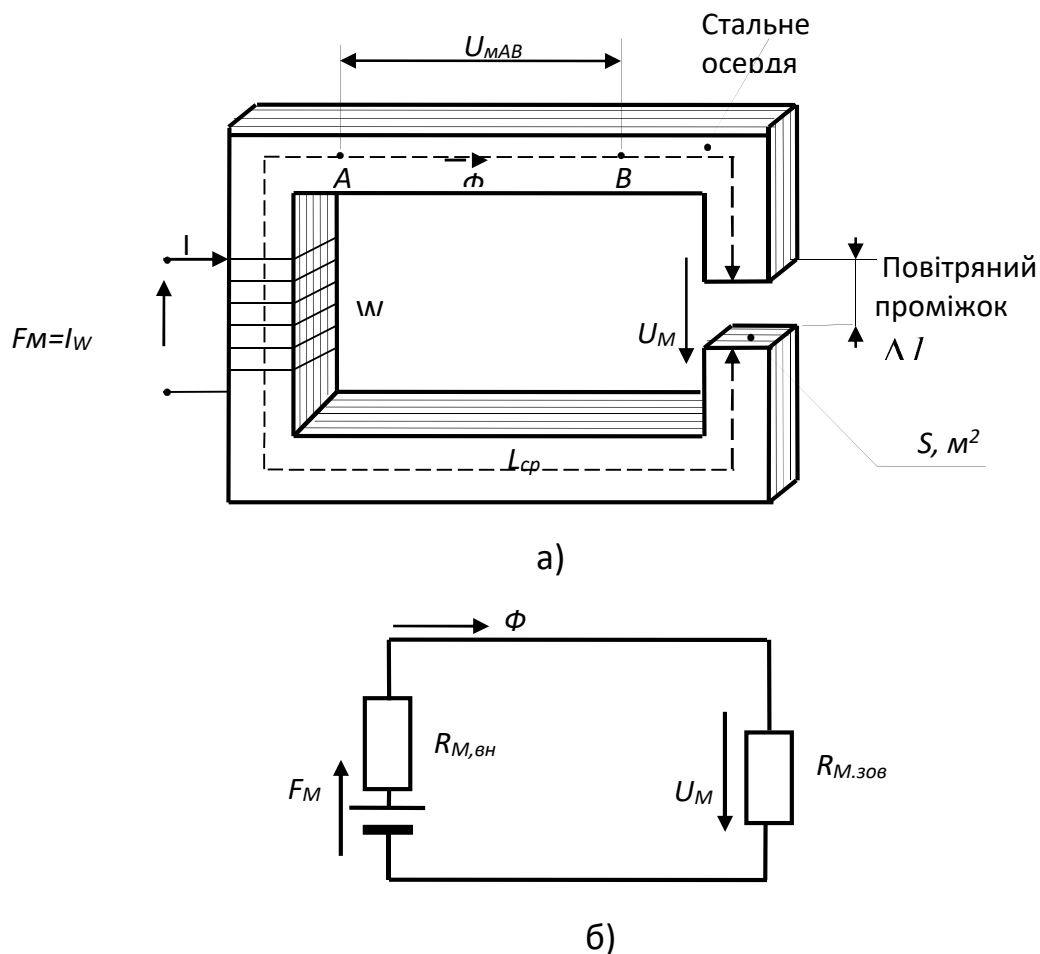


Рис. 3.5. Просте магнітне коло:
а) загальний вигляд; б) схема заміщення кола.

Електричний струм I у витках котушки збуджує магнітний потік Φ в магнітопроводі магнітного кола. Магнітний потік заданої густини може бути створений великим струмом за малої кількості витків або ж, навпаки, малим струмом за великої кількості витків. У даному випадку визначальною величиною слугує сумарний струм у всіх витках котушки,

який здатний збуджувати магнітне поле, тобто утворювати магніторушійну силу (F_M).

$$F_M = \sum \cdot I = I \cdot w. \quad (3.11)$$

Магнітний потік визиває на кожній ділянці магнітного кола **спад магнітної напруги**, або ж, простіше магнітну напругу U_M . Магнітна напруга між двома точками А і В однорідного магнітного поля, що розташовані на одній магнітній лінії може бути виражена добутком напруженості поля на відстань між цими точками $U_M = H \cdot l$.

Магнітна напруга U_M в системі СІ вимірюється в амперах.

$$[U_M] = 1 \frac{A}{m} \cdot 1m = 1A.$$

Формально магнітна напруга аналогічна спаду електричної напруги U на ділянці електричного кола.

Для магнітного кола з МРС F_M справедливе співвідношення, яке за своєю формою аналогічно відповідному виразу для електричного кола, що утримує замкнений контур $\sum U = \sum E$:

$$\sum U_M = F_M = \sum I.$$

Останнє рівняння формулюється таким чином: сума спадів магнітної напруги на всіх ділянках магнітного кола, що створює замкнений шлях (контур), дорівнює діючій у цьому контурі магніторушійній силі.

3.4. Основні закони магнітних кіл

До основних законів магнітних кіл відносяться закон Ома та два закони Кірхгофа для магнітного кола. Ом і Кірхгоф не є авторами цих законів. Вони названі їх іменами за аналогією до відповідних законів електричного кола.

3.4.1. Закон Ома для ділянки магнітного кола

Для ділянки магнітного кола по аналогії з електричним колом вводиться поняття магнітного опору ділянки:

$$R_M = \frac{U_M}{\Phi}. \quad (3.12)$$

Магнітний опір середовища можна уявити як міру його здатності протидіяти проходженню магнітного потоку.

Одиницею вимірювання магнітного опору є:

$$[R_M] = \frac{A}{B_\sigma} = \frac{A}{B \cdot c}.$$

Значення магнітного опору залежить від геометричної форми і розмірів ділянки магнітного кола, а також від властивостей матеріалу (середовища) цієї ділянки.

Так, наприклад, для магнітопроводу (Рис.3.9) (без урахування опору повітряного проміжку) магнітний опір розраховується за формулою:

$$R_M = \frac{l_{cp}}{\mu_0 \cdot \mu \cdot S} = \frac{l_{cp}}{\mu_a \cdot S}. \quad (3.13)$$

аналогічно $\frac{\ell}{\gamma S} = R$ електричному опору.

Величина, зворотна до магнітного опору, називається магнітною провідністю:

$$G_m = \frac{I}{R_M} = \frac{\mu_a \cdot S}{\ell_{cp}}. \quad (3.14)$$

За позначеннями у формулах (3.12) і (3.13) аналогічно закону Ома для електричного кола одержимо вираз закону Ома для ділянки магнітного кола:

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}. \quad (3.15)$$

Магнітний потік для ділянки магнітного кола прямо пропорційний магнітній напрузі й обернено пропорційний магнітному опору цієї ділянки.

Слід застережити, що аналогія між електричним і магнітним колом (як і аналогія між магніторушійною силою F_m і електрорушійною силою E) чисто формальна. Сутність фізичних процесів у цих колах є зовсім різною.

Важливо також відмітити, що магнітний опір кола із феромагнітних матеріалів має нелінійний характер, так як магнітна проникність μ залежить від напруженості H , а магнітний опір повітряного проміжку лінійний, так як для нього $\mu=1$. Через нелінійність закон Ома для ділянок із феромагнітних матеріалів практично не використовують.

3.4.2. Перший закон Кірхгофа для магнітного кола

Перший закон Кірхгофа або вузлове рівняння для магнітного кола: алгебраїчна сума магнітних потоків в будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0, \quad (3.16)$$

де n – число віток магнітного кола у вузлі;

Φ_k – потік кількості вітки, приєднаної до вузла.

Потоки одного напрямку, наприклад ті, що відходять від вузла, записуються зі знаком плюс, другого напрямку – зі знаком мінус.

Закон є наслідком того фізичного факту, що магнітний потік через замкнену поверхню дорівнює нулю, так як лінії магнітного потоку замкнені.

Наприклад, для вузла ділянки магнітного кола, зображеного на рис. 3.6, $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi = 0$.

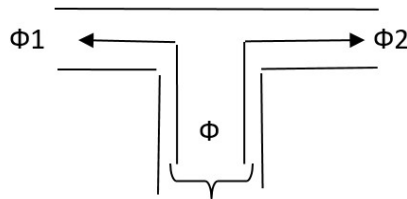


Рис. 3.6. Вузол ділянки магнітного кола

3.4.3. Другий закон Кірхгофа для ділянки магнітного кола (Закон повного струму)

Магнітне поле, як відомо, утворюється електричними струмами. Кількісний зв'язок між лінійним інтегралом вектора напруженості магнітного поля \vec{H} вздовж будь-якого замкненого контуру й алгебраїчною сумою струмів, що охоплені цим контуром (рис. 3.7) визначається законом повного струму і є другим законом Кірхгофа для магнітного кола.

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint \vec{H} \cos \alpha d\vec{l} = \sum_{k=1}^n I_k, \quad (3.17)$$

де \vec{H} вектор напруженості магнітного поля в будь-якій точці довільного контуру;

$d\vec{l}$ вектор елемента довжини контуру;

$\sum_{k=1}^n I_k$ алгебраїчна сума струмів (або повний струм), що охоплений контуром.

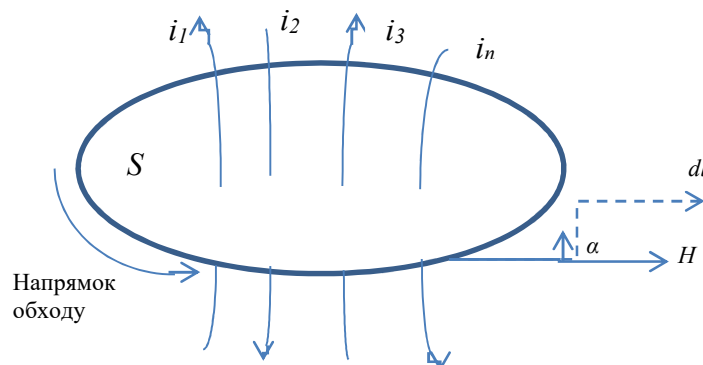


Рис. 3.7. До пояснення закону повного струму

Струм I_n , що пронизує контур l , вважається позитивним (додатним) якщо прийнятий напрям обходу контура і напрям цього струму пов'язані правилом право ходового гвинта (буравчика).

Електричний струм також тече по замкненому контуру, і закон повного струму пов'язує електричний струм і напруженість магнітного поля. Образно кажучи, вони пов'язані один із одним як дві ланки одного ланцюга.

Закон повного струму є дослідним і може бути перевірений експериментальним шляхом, якщо вимірювати лінійний інтеграл $\oint \vec{H} d\vec{l}$ за допомогою спеціального пристрою, відомого із курсу фізики як магнітний пояс.

3.5. Аналогія між електричними і магнітними колами

Цілком доцільно показати ряд аналогій між електричними і магнітними колами, так як це буде сприяти кращому розумінню тих залежностей, яким підкорюються електромагнітні явища. Зіставлення електричного кола із магнітним колом відкриває ряд формальних аналогій у цих двох фізичних об'єктів (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4

Аналогія між електричними і магнітними колами

Електричні величини	Одиниці вимірювання	Магнітні величини	Одиниці вимірювання
1	2	3	4
Електрорушійна сила (ЕРС) E_i	В (вольт)	Магніторушійна сила (МРС) $F_m = I \cdot w$	А (ампер)
Електричний струм $I = \frac{Q}{t} = \frac{K_n}{c}$	А (ампер)	Магнітний потік $\Phi = \vec{B} S$	В*с або B_σ (вебер)
Густина струму $\delta = \frac{I}{S}$	$\frac{A}{m^2}$	Магнітна індукція $\vec{B} = \frac{F_{em}}{I \ell}$	T_n (тесла)
Електричний опір $R = \frac{l}{\gamma \cdot S}$	Ом	Магнітний опір $R_M = \frac{l_{cp}}{\mu_a \cdot S}$	$\frac{A}{B_\sigma}$

Продовження таблиці 3.4

Напруга, різниця потенціалів (спад напруги) $U_{ав} = \varphi_a - \varphi_b$	В (вольт)	Різниця скалярних магнітних потенціалів $U_{магн} = \int_a^b Hdl = U_a - U_b$	А (ампер)
Напруженість електричного поля E	$\frac{В}{м}$	Напруженість магнітного поля H	$\frac{А}{м}$
Питома провідність γ	$\frac{См}{м}$, $\left(\frac{Сіменс}{м}\right)$	Абсолютна магнітна проникність μ_a	$\frac{Ом \cdot с}{м}$
Закон Ома			
$I = \frac{U}{R}$	$A = \frac{B}{Ом}$	$\Phi = \frac{U_{м}}{R_{м}}$	$Bб = Bс$
Перший закон Кірхгофа			
$\sum I_i = 0$ в вузлі		$\sum \Phi_i = 0$ в вузлі	
Другий закон Кірхгофа для замкненого контура			
$\sum U = 0; \sum I_i R_i = \sum E_i$		$\sum U_{м} = \sum F_{м}; \sum \Phi_i R_{mi} = \sum F_{mi}$	

Приклад 3.1. Циліндрична котушка має площу поперечного перерізу $S = 5\text{см}^2$, довжину $\ell = 20\text{см}$ і кількість витків $w = 250$. По обмотці котушки проходить струм $I = 2\text{А}$. Знайти напруженість H магнітного поля, магніту індукцію B і магнітний потік Φ котушки.

Розв'язання

1. Напруженість магнітного поля

$$H = \frac{I \cdot w}{l} = \frac{2 \cdot 250}{0.2} = 2500 \text{ А/м.}$$

2. Магнітна індукція

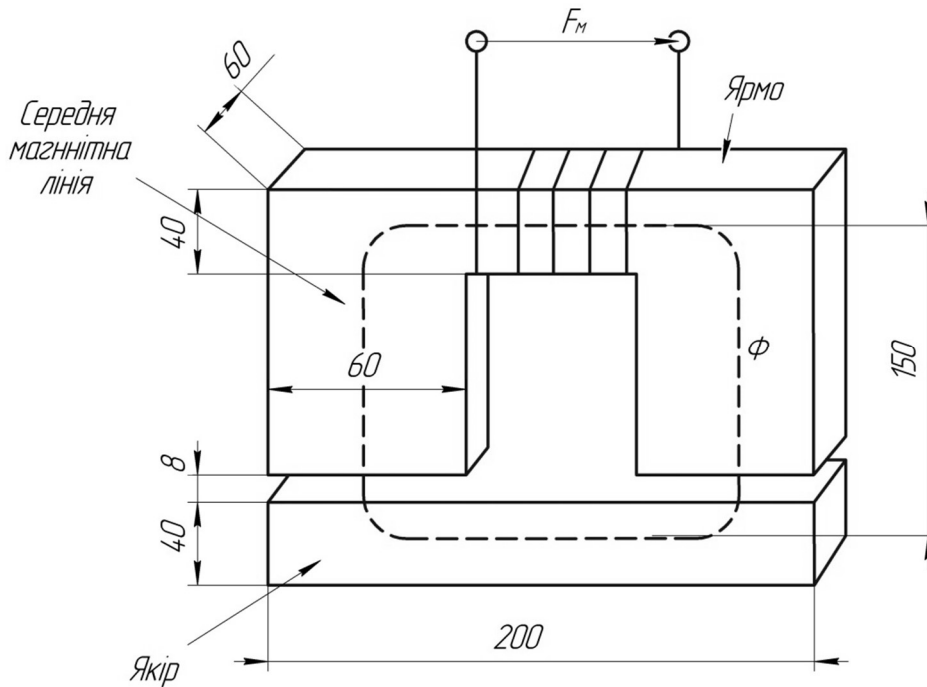
$$\bar{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot H = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 2500 = 31,4 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

3. Магнітний потік

$$\Phi = B \cdot S = 31,4 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 157 \cdot 10^{-8} \text{ Вб.}$$

Задача 3.2. Для магнітного кола, зображеного на рисунку до задачі, слід вибрати таку МРС, при якій в обох повітряних проміжках магнітна індукція $B_{нов.пр.} = 0,35 \text{ Тл}$.

Задачу розв'язати для матеріалів магнітопроводу: а) листована електротехнічна сталь; б) чавун.



Розміри магнітного кола з повітряним проміжком

Розв'язання:

1. Для розрахунків магнітного кола з повітряним проміжком розрахунок слід починати із значення магнітного потоку в повітряному зазорі. За даними рисунка розмір проміжка: довжина $\delta=8\text{мм}$, площа поперечного перерізу $S_{\text{пов.пр}} = 60 \times 60\text{мм}^2 = 0,06^2\text{ м}^2$.

$$\Phi_{\text{пов.пр.}} = B_{\text{пов.пр.}} \cdot S_{\text{пов.пр.}} = 0,35 \cdot 0,06^2 = 12,6 \cdot 10^{-4}\text{ Вб}$$

2. Враховуючи, що приблизно 10% загального магнітного потоку втрачається в навколишньому повітряному середовищі (потоки розсіювання), знаходимо загальний магнітний потік котушки.

$$\Phi = 12,6 \cdot 10^{-4} + \frac{12,6 \cdot 10^{-4} \cdot 10}{100} = 13,86 \cdot 10^{-4}\text{ Вб.}$$

3. Припустимо також, що всі магнітні лінії потоку розсіювання замикаються в межах ярма, тобто $\Phi = \Phi_{\text{яр.}}$

У такому разі магнітна індукція в ярмі, площина якого $40 \times 60\text{мм}^2 = 0,04 \times 0,06\text{ м}^2$ буде

$$B_{\text{яр.}} = \frac{\Phi_{\text{яр.}}}{S_{\text{яр.}}} = \frac{13,86 \cdot 10^{-4}}{0,04 \cdot 0,06} = 0,578\text{ Тл.}$$

Для розрахунку значення магнітної індукції B_n в полюсах магнітопроводу (вертикальні ділянки кола, зображених на приведеному до задачі рисунку) будемо виходити з того значення магнітного потоку, який є середнім між потоком в ярмі і потоком у повітряному проміжку (зазорі), тобто будемо вважати, що потік в полюсах:

$$\Phi_n = \frac{\Phi_{яp} + \Phi_{пов.пр}}{2} = \frac{13,86 \cdot 10^{-4} + 12,6 \cdot 10^{-4}}{2} = 13,23 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Отже, магнітна індукція в полюсі, площа якого дорівнює площі повітряного проміжку визначається рівнянням:

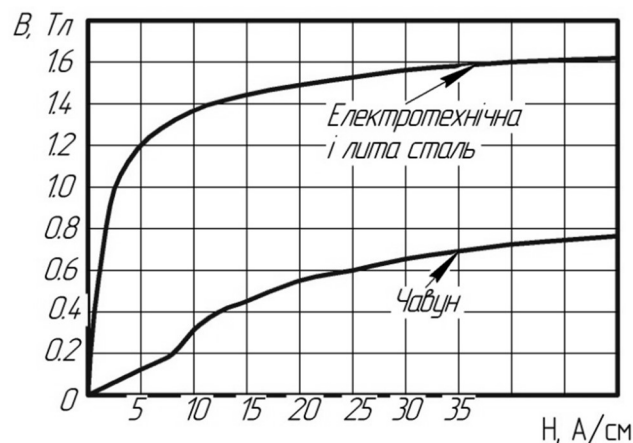
$$B_n = \frac{\Phi_n}{S_n} = \frac{13,23 \cdot 10^{-4}}{0,06^2} = 0,367 \text{ Тл.}$$

Слід вважати, що магнітний потік в якорі, площа якого $0,04 \times 0,06 \text{ м}^2$, дорівнює магнітному потоку в зазорі, і тоді магнітна індукція в якорі буде:

$$B_я = \frac{\Phi_я}{S_я} = \frac{12,6 \cdot 10^{-4}}{0,04 \cdot 0,06} = 0,525 \text{ Тл.}$$

Якщо мати на увазі, що магнітний потік розсіювання досить невеликий, то розрахунок істотно спрощується, так як в такому разі на всіх ділянках магнітного кола магнітний потік один і той же.

4. За значеннями магнітної індукції по кривим намагнічування, що приведені нижче, знаходимо значення напруженості магнітного поля:



Криві намагнічування звичайної листової електротехнічної сталі і чавуна

а) для листової електротехнічної сталі:

$$H_{яp} = 1,3 \text{ А/см}; H_n = 0,8 \text{ А/см.}; H_я = 1,2 \text{ А/см.}$$

б) для чавуна:

$$H_{яp} = 20,5 \text{ А/см}; H_n = 11,5 \text{ А/см.}; H_я = 17,1 \text{ А/см.}$$

5. На окремих ділянках магнітного кола визначаємо довжину середньої магнітної лінії: $l_я = l_{яp} \approx 16,3 \text{ см.}; l_n = 2 \cdot 10,2 = 20,4 \text{ см.}$

6. Сумарна магнітна напруга на ділянках кола із феромагнітного матеріалу визначається за рівнянням:

$$U_{м,ф} = H_{яp} l_я + H_n l_n + H_я l_я$$

Це рівняння являє собою математичний запис закону повного струму, див. п.3.4.3.

$$F_m = \sum \cdot I = \sum \cdot U_m,$$

але за формулою (3.21) $F_m = I \cdot w = H \cdot l$ і тоді $U_m = \sum \cdot H \cdot l$

Підстановкою даних у вихідне рівняння, отримуємо:

а) для листової електротехнічної сталі

$$U_{m,\phi} = 1.3 \cdot 16.3 + 0.8 \cdot 20.4 + 1.2 \cdot 16.3 = 57 \text{ A},$$

б) для чавуна

$$U_{m,\phi} = 20.6 \cdot 16.3 + 11.5 \cdot 20.4 + 17.1 \cdot 16.3 = 846 \text{ A}.$$

Виконаний розрахунок показує, що для створення необхідного значення магнітної індукції в повітряному проміжку у випадку магнітопроводу із чавуна вимагається приблизно в 15 раз більша МРС, як у випадку магнітопроводу із листової електротехнічної сталі.

7. Сумарна довжина двох повітряних проміжків

$$l_{\text{я}} = 2 \cdot 0.008 = 0.016 \text{ м}.$$

8. За даною магнітною індукцією знаходимо значення напруженості магнітного поля в повітряному проміжку (див. формулу 3.20)

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu} = \frac{B}{\mu_0 \cdot 1}; H_{\text{нов.}} = \frac{B}{1,236 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,35 = 0,28 \cdot 10^6 \text{ A/м}$$

(для повітря $\mu = 1$)

9. Визначаємо відповідну магнітну напругу

$$U_{m,\text{нов.}} = H_{\text{нов.}} \cdot l_{\text{нов.}} = 0,28 \cdot 10^6 \cdot 0,016 = 4480 \text{ A}.$$

Таким чином, не дивлячись на те, що шлях магнітного потоку у феромагнітному матеріалі майже в 24 рази більший, ніж у повітрі, магнітна напруга на ділянках із феромагнітного матеріалу у випадку використання листової електротехнічної сталі складає менше 1% (а для чавуна – близько 13 %) магнітної напруги на повітряному проміжку (зазорі).

10. Визначаємо необхідну МРС;

а) для листової електротехнічної сталі

$$F_{em} = U_{m,\phi} + U_{m,\text{нов.}} = 57 + 4480 = 4537 \text{ A};$$

б) для чавуна

$$F_{em} = 846 + 4480 = 5326 \text{ A}.$$

3.6. Електромагнетизм і закон електромагнітної індукції

3.6.1. Електромагнітні явища

Явища електромагнітних взаємодій складають основу одного із важливих виразів перетворення електричної енергії, а саме перетворення електричної енергії у механічну і навпаки. До них відноситься взаємодія електричного струму з магнітним полем.

Видатний внесок у розвиток науки про електромагнітні явища вніс великий англійський фізик М. Фарадей. Його досліди склали в науці цілу

епоху і були викладені у великому творі «Експериментальні дослідження з електрики», над яким він працював 24 роки.



Майкл Фарадей (22.09.1791 – 25.08.1867) – англійський фізик, член Лондонського королівського товариства. Народився в Лондоні, вчився самостійно.

Дослідження в області електрики, магнетизму, магнітооптики, електрохімії. У 1831р. відкрив явище електромагнітної індукції – виникнення електричного струму в провіднику при зміні магнітного потоку через контур провідника, встановив закони електромагнітної індукції, винайшов вольтметр, відкрив діамагнетизм і парамагнетизм. Ввів термін і поняття поля, першим застосував термін «магнітне поле», експериментально доказав закон збереження електричного заряду зробив багато відкриттів, пов'язаних з хімією та електролізом. Був популяризатором фізики, його книжка «Історія свічки» перекладена практично на всі мови світу.

М. Фарадей відкрив електромагнітну індукцію, яка стала основою електротехніки. Він виявив усі основні випадки збудження індукційних струмів і простір, що приймає участь у передачі електричної дії, назвав його полем і в своїй уяві бачив силові лінії – потоки електричних і магнітних сил, що пронизують простір.

3.6.2. Електрика із магніту та закон електромагнітної індукції

При русі провідника в магнітному полі і перетинанні провідником магнітних силових ліній, на кінцях цього провідника виникає різниця потенціалів, або, теж саме, в провіднику виникає ЕРС (явище електромагнітної індукції). Це ЕРС одержала назву ЕРС індукції.

Явище електромагнітної індукції може бути продемонстровано такими дослідами. Всередину котушки з витками проводу, кінці якої з'єднані з чутливим мілівольтметром (mV), з певною швидкістю вводиться постійний магніт (N - S). Стрілка мілівольтметра при цьому буде відхилитись, виявляючи електричний струм в котушці (рис. 3.3, а). При виведенні магніту із котушки стрілка mV відхилиться в зворотному напрямку. Таким чином, ми отримали струм із магніту.

Мілівольтметр виявить струм в котушці, якщо її переміщати відносно іншої (другої) котушки зі струмом, яку будемо називати первинною (рис.3.8).

На рис. (3.8, в) показані дві котушки, розташовані на одному каркасі. Одна з них приєднана до джерела електричної енергії через вимикач SA; друга замкнена на вольтметр. Котушки електрично між собою не пов'язані,

але при вмиканні вимикача SA спостерігається відхилення стрілки mV в одну сторону, при вимиканні – в іншу.

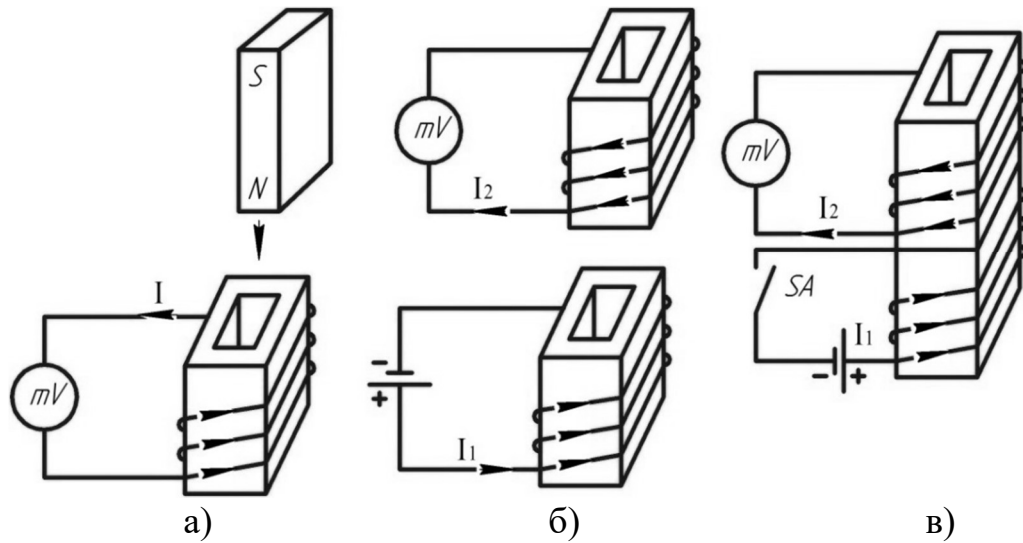


Рис. 3.8. Досліди для спостереження магнітної індукції

Не дивлячись на те, що досліди, на перший погляд, мають різний характер, однаковий їх результат дає можливість вважати, що безпосередня причина виникнення електричного струму в колі вторинної котушки в цих дослідах однакова.

Виникнення індукованої ЕРС в контурі (або на його ділянці) при всякій зміні потокозчеплення цього контура називається явищем електричної індукції. Під дією індукованої ЕРС в замкненому контурі виникає індукований електричний струм.

Виникнення індукованого струму означає, що у вторинний контур передається енергія, яка при наявності опору в колі буде перетворюватись в тепло. В перших двох дослідах електрична енергія виникла за рахунок механічної роботи при переміщенні постійного магніту (рис. 3.8, а) або котушки (рис. 3.8, б). В третьому досліді обидві котушки нерухомі, тобто ніякої механічної роботи не виконується.

Електрична енергія у вторинній котушці виникла за рахунок енергії джерела, що ввімкнене у колі первинної котушки. У цьому випадку електрична енергія передається із одного кола в друге за допомогою магнітного поля. Явище передачі електричної енергії із одного кола в друге за допомогою магнітного поля називається трансформацією, а прилади, в колах змінного струму, що перетворюють, один рівень напруг і струмів в інший рівень називаються трансформаторами.

Перетворення енергії із одного виду в другий за допомогою магнітного поля або зміна енергії поля кількісно визначається через абсолютне значення зміни потокозчеплення.

Явища електромагнітної індукції, що супроводжують ці процеси, пов'язані зі швидкістю зміни потоку зчеплення.

Закон електромагнітної індукції встановлює кількісний вираз для індукованої ЕРС: електрорушійна сила, індукована в замкненому контурі при зміні зчепленого з ним магнітного потоку, дорівнює швидкості зміни потокозчеплення, взятої з від'ємним знаком.

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.18)$$

(В цій формі закон електромагнітної індукції був даний пізніше другим англійським вченим Максвелом)

В котушці, що має декілька витків, загальна ЕРС залежить від кількості витків w . Якщо всі витки котушки зчеплені з однаковим магнітним потоком, то ЕРС буде в w раз більше:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.19)$$

ЕРС котушки, як було викладено вище, визначається швидкістю зміни потокозчеплення. Загальна формула закону електромагнітної індукції має вигляд:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (3.20)$$

ψ - потокозчеплення – сума магнітних потоків зчеплених з витками котушки,

$$\psi = w \cdot \Phi \quad (3.21)$$

Схематично це показано на рис 3.9.

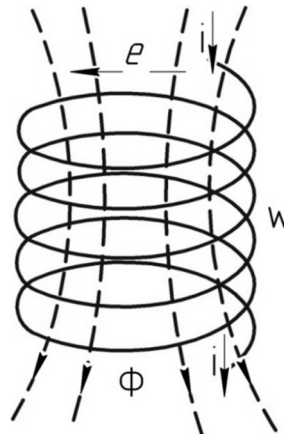


Рис. 3.9. Потокозчеплення циліндричної котушки

Потокозчеплення і струм котушки пов'язані таким співвідношенням

$$\psi = L \cdot i, \quad (3.22)$$

де i – струм, що змінюється за напрямком і величиною; L – коефіцієнт пропорційності, що називається індуктивністю.

Одиниця індуктивності:

$$[L] = \left[\frac{\psi}{i} \right] = \frac{1B \cdot c}{A} = 1Om \cdot c = 1Гн \text{ (генрі)}.$$

Одиниці індуктивності присвоєно найменування «генрі» на честь американського фізика Д. Генрі (1797 – 1878)

Індуктивністю в один генрі володіє коло, у якому наводиться ЕРС в 1В при зміні струму зі швидкістю $\frac{1A}{1c}$.

Індуктивність являється показником концентрації магнітного поля і характеризує можливість виникнення в даному пристрої, що зчеплений з магнітним потоком (котушці або обмотці) більшої чи меншої ЕРС самоіндукції за змінним потокозчепленням, отже

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}. \quad (3.23)$$

Знак - «мінус» у виразі (3.23) вказує на те, що при зменшенні (спаді) струму ЕРС самоіндукції буде додатною, тобто буде співпадати за напрямком зі струмом. Навпаки при збільшенні (зростанні) струму ЕРС буде від'ємною, тобто матиме напрямок назустріч струмові.

Енергія W_m , що накопичується в магнітному полі кола (котушці або обмотці) при збільшенні струму в ньому від нуля до сталого значення, може бути визначена,

$$W_m = \int_0^I L \cdot I \cdot dI = \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{\psi \cdot I}{2} = B \cdot A \cdot c = Дж, \quad (3.24)$$

де $\psi = LI$ потокозчеплення.

Запас енергії W_m магнітного поля електричних кіл відносно незначний – зазвичай порядку одиниць джоулів або частки джоуля. Разом з тим вплив цієї енергії на протікання процесів в колах може бути дуже великим.

Приклад 3.3. Визначити індуктивність котушки довжиною 30 см, діаметром 6 см і з 1000 кількістю витків.

Розв'язання:

1. Магнітний потік котушки, враховуючи вирази (3.6) і (3.9),

$$\Phi = \mu_0 \frac{I \cdot w \cdot S}{l};$$

а потокозчеплення котушки

$$\psi = w \cdot \Phi = \mu_0 \frac{I \cdot w^2 \cdot S}{l};$$

2. Індуктивність котушки

$$L = \frac{\psi}{I} = \mu_0 \frac{w^2 \cdot S}{l} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{10^6 \cdot 3.14 \cdot 6^2 \cdot 10^{-4}}{0.3 \cdot 4} = 1.18 \cdot 10^{-2} Гн .$$

3.6.3. Рух провідника в постійному магнітному полі

Явище електромагнітної індукції можна також отримати при русі провідника в постійному (однорідному) магнітному полі.

На рис. 3.10. показаний такий пристрій

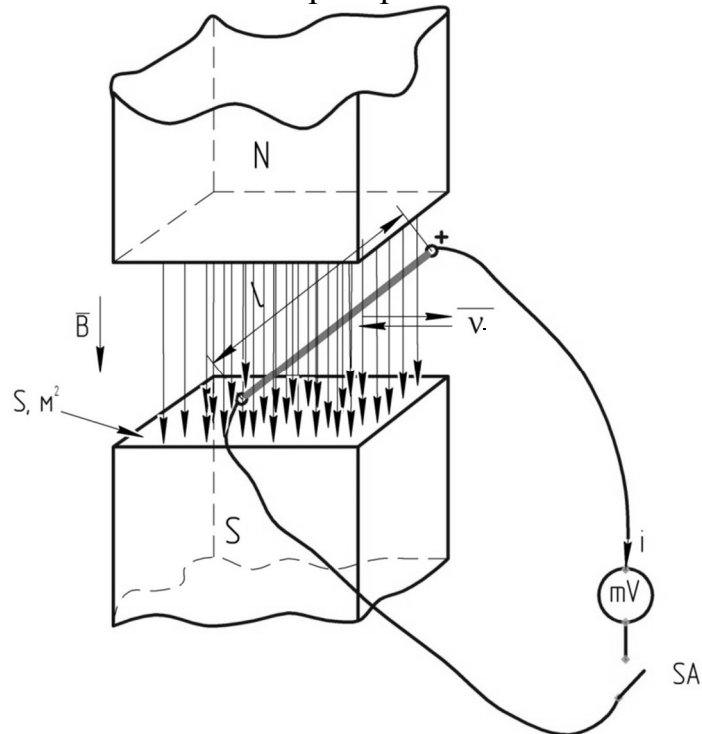


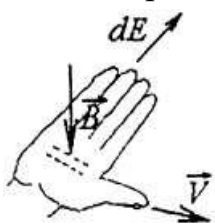
Рис. 3.10. Наведення ЕРС під час руху провідника в магнітному полі

Між полюсами магніта NS рухається зі швидкістю v перпендикулярно напрямку магнітних ліній провідник, довжина якого в межах магнітного поля дорівнює l . В провіднику виникає (наводиться) ЕРС-е пропорційна інтенсивності магнітного поля, в якому рухається провідник, тобто магнітній індукції B , швидкості переміщення провідника v і довжині провідника l , а саме:

$$e = B \cdot v \cdot l \quad (3.25)$$

Якщо кінці провідника замкнуті вимикачем SA через мілівольтметр mV, то в замкненому контурі виникне електричний струм i під дією ЕРС індукції, як показано стрілкою на рис. 3.10.

Напрямок дії ЕРС індукції визначається правилом правої руки.



Якщо розмістити праву руку так, щоб магнітні лінії (тобто вектор індукції) входили в долоню, а відігнутий великий палець направити за напрямом руху провідника в магнітному полі, то решта чотири витягнуті пальці покажуть напрям дії ЕРС індукції, що виникає в провіднику.

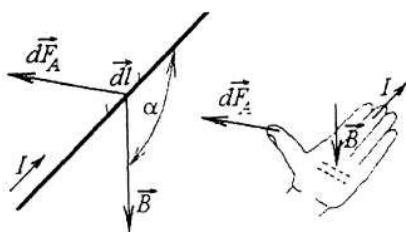
В приведеній схемі ЕРС індукції (3.25) виникає при переміщенні провідника в нерухомому магнітному полі, коли провідник перетинає магнітні лінії. Проте, ЕРС індукції виникає і в випадку, коли провідник залишається непорушним, а рухається магнітне поле, тобто забезпечується відповідний рух провідника по відношенню до поля з перетинанням провідником магнітних ліній.

3.6.4. Принцип Ленца

Принцип Ленца, що має по суті значення закону, встановлює реакцію магнітної системи на внесення в неї збудження, а також зв'язок між електромагнітними і магнітоелектричними явищами.

Реакція магнітної системи, за вченням Ленца, виражається в тому, що система відзивається на зовнішнє збудження прагненням відновити свій попередній стан. Ця реакція магнітної системи і лежить в основі зв'язку електромагнітних і магніто-електричних явищ. Ленц формулює свій принцип, застосовуючи його до взаємного зв'язку цих явищ таким чином: «Кожному явищу руху під дією електромагнітних сил повинна відповісти подія електромагнітної індукції», або напрямок індукованої ЕРС такий, що викликаний нею струм завжди протидіє причині появи ЕРС.

За законом електромагнітної індукції якщо провідник рухається в магнітному полі у ньому виникає ЕРС індукції, напрямок дії якої визначається за правилом правої руки. Якщо провідник залишається незамкненим, то не дивлячись на ЕРС, що в ньому виникла, струму у провіднику не буде і ніякого збудження в магнітну систему не вноситься. Якщо ж провідник замкнути, то в утвореному магнітному колі виникає струм, напрямок якого співпадає з напрямком дії ЕРС індукції. Власне магнітне поле провідника зі струмом слід розглядати як збурення, що внесено в магнітну систему. Реакція системи виражається в тому, що в результаті взаємодії провідника зі струмом і магнітного поля з'являється сила, яка за правилом лівої руки виявляється направленою проти напрямку руху провідника, тобто перешкоджає його руху.



Таким чином, принцип Ленца пов'язує в одне ціле закони електромагнітних взаємодій, що має важливе практичне значення у розробці та використанні електричних генераторів струму, електродвигунів, апаратів.

3.6.5. Застосування закону електромагнітної індукції

Як уже згадувалось, закон електромагнітної індукції має дуже велике значення для виробництва електроенергії. Проте уже розглянуті випадки виникнення електромагнітної індукції не можуть ще слугувати

основою для довготривалого у часі виробництва електричної енергії. Необхідний постійний рух провідника, наприклад, його обертання. Саме таким чином утворюються ЕРС в електричних генераторах, змінні як за значенням, так і за напрямом.

Якщо зважити, що тепер у всьому світі генератори, що виробляють електроенергію працюють за таким принципом, то є очевидним - яке велике практичне значення має використання закону електромагнітної індукції.

Перетворювачі електричної енергії в механічну – електричні двигуни, статичні електричні перетворювачі одного рівня напруги в інший – трансформатори також працюють у відповідності з законом електромагнітної індукції. Перетворення в них відбувається через магнітне поле.

Принцип одержання ЕРС індукції в електромеханічних перетворювачах можна пояснити слідуєчим чином: в однорідному магнітному полі ($\vec{B} = \text{const}$). З постійною кутовою швидкістю ω обертається рамка із дроту (рис. 3.11, а), вісь обертання якої перпендикулярна магнітним лініям. При такому обертальному русі, не дивлячись на його рівномірність, швидкість перетинання магнітних ліній двома горизонтальними сторонами рамки, що обертаються, – непостійна. Через це не можна використовувати безпосередньо рівняння (3.35) для визначення наведеної у рамці ЕРС.

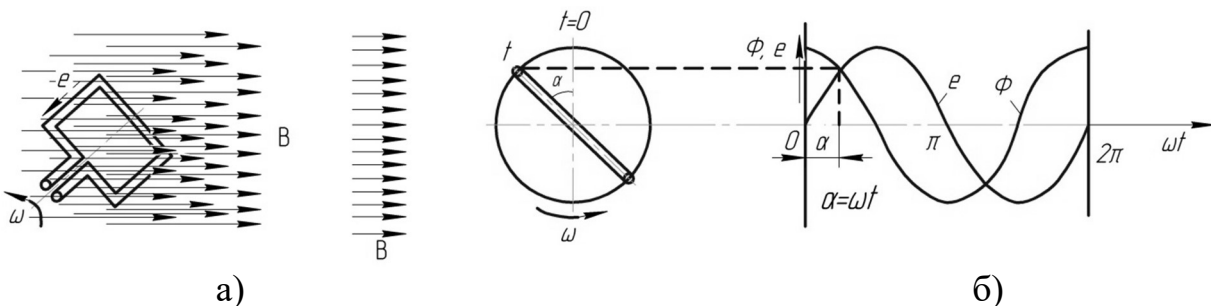


Рис. 3.11. Наведення ЕРС при обертанні витка в магнітному полі

Пронизуючий рамку (обхоплюючий рамкою) магнітний потік (рис. 3.11, а) за постійною кутовою швидкістю рамки залежить від її кутової координати $\alpha = \omega \cdot t$ і змінюється за законом косинуса, так як прийнято, що в момент часу $t = 0$ площина рамки розташована перпендикулярно до магнітних ліній ($\alpha=0$), і пронизуючий рамку магнітний потік максимальний.

При зміні потоку по косинусоїдному закону ЕРС індукції згідно з законом електромагнітної індукції в загальному вигляді, згідно формули (3.18)

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

змінюється синусоїдально. Знак «мінус» перед другою частиною формули показує, що напрям наведеної ЕРС відповідає правилу Ленца (тобто індукований струм буде гальмувати зміну магнітного поля).

Обидві функції зображені на рис. 3.11, б.

Принцип наведення ЕРС при обертанні витка в магнітному полі використовується на практиці для отримання синусоїдального змінного струму.

Закон електромагнітної індукції лежить в основі принципу будови не тільки електричних машин, але і в установок індукційного нагрівання і індукційного плавлення металів (див. розділ 1).

Крім того, закон електромагнітної індукції використовується в галузі слабких струмів: в техніці зв'язку, передачі інформації на короткі і довгі відстані, в радіолокації для виявлення в просторі різних об'єктів, вимірювання їх координат і визначення інших характеристик; в радіонавігації через штучні супутники, в космічному зв'язку і в багатьох інших галузях людської діяльності.

3.6.6. Самоіндукція і взаємна індукція

Самоіндукція. Внаслідок явища електромагнітної індукції у витку провода, що охоплює змінний магнітний потік, індукується ЕРС.

Якщо зміна магнітного потоку $d\Phi$ виникає у результаті зміни струму di в самому витку провода (рис. 3.12), то має місце так зване явище **самоіндукції**.

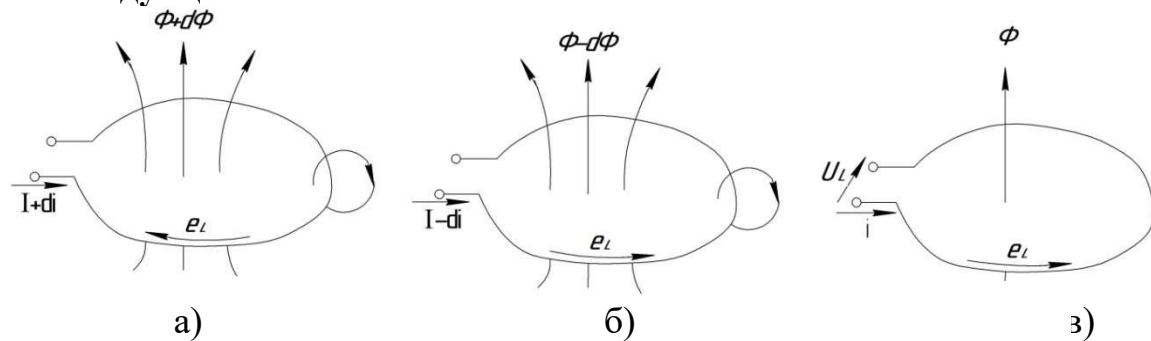


Рис. 3.12. Явище самоіндукції

В результаті самоіндукції виникає ЕРС e_L , яка створює струм, що протидіє тій зміні струму, яка визвала ЕРС самоіндукції.

На рис. 3.12, (а, б) стрілками показано дійсний напрямок ЕРС самоіндукції в витку провода e_L . Так як приріст струму в одному випадку додатне ($+di$), а в другому відємне ($-di$), то на цих рисунках стрілки, що вказують напрямок ЕРС самоіндукції, мають протилежний напрямок.

В загальному вигляді явище самоіндукції можна математично записати так:

$$\frac{di}{dt} \rightarrow \frac{d\phi}{dt} \rightarrow e_L.$$

Явищу самоіндукції можна додати слідує визначення:

Люба зміна за часом електричного струму на основі закону повного струму (див. п. 3.4.3) визиває зміну магнітного потоку, яка в свою чергу на основі закону електромагнітної індукції визиває ЕРС самоіндукції; ЕРС, що виникла в результаті явища самоіндукції протидіє зміні струму в провіднику.

Зміна струму може бути одноразовою (наприклад, у результаті розмикання або замикання електричного кола), або періодичною у випадку протікання змінного (періодичного) струму в провіднику.

ЕРС самоіндукції визначається за законом електромагнітної індукції (3.18)

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

де w – число витків.

Беручи до уваги закон Ома для магнітних кіл

$$\Phi = \frac{I \cdot w}{R_M},$$

одержимо

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{w}{R_M} \cdot \frac{di}{dt}. \quad (3.26)$$

Ця формула передбачає, що магнітний опір – постійна величина, тобто магнітна проникність середовища постійна (до феромагнітних матеріалів це не відноситься).

Таким чином, ЕРС, що виникає за явищем самоіндукції,

$$e_L = -\frac{w^2}{R_M} \cdot \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (3.27)$$

коефіцієнт $\frac{w^2}{R_M}$ – індуктивність L провідника або системи провідників, наприклад, одиничного витка або котушки.

З урахуванням співвідношення (3.13) для індуктивності одержимо таку формулу:

$$L = \frac{w^2}{R_M} = w^2 \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot S}{I_{cp}}. \quad (3.28)$$

Із рівняння (3.28) видно, що індуктивність L залежить від геометричних розмірів провідника, тобто є його особистою характеристикою.

У провіднику з індуктивністю L при струмі, що змінюється, виникає ЕРС самоіндукції, що протидіє зміні струму (3.26). Через це до виводів провідника з індуктивністю L необхідно прикласти напругу U_L , що зрівноважує ЕРС самоіндукції (рис. 3.12, в):

$$U_L = -e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (3.29)$$

протікає струм, що змінюється в часі, напруга на виводах

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (3.30)$$

або

$$U = U_R + U_L, \quad (3.31)$$

де U_R і U_L – напруги або спади напруг на опорі й індуктивності, відповідно.

На рис.3.13 ці спади напруг показані роздільно, хоч вони і виникають на одному і тому ж елементі електричного кола з опором R і індуктивністю L .

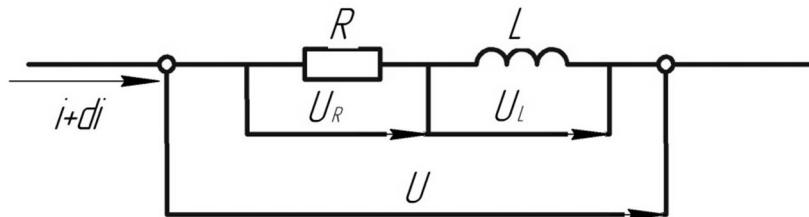


Рис. 3.13. Спад напруги на індуктивному опорі

Як уже відмічалось, одиницею вимірювання індуктивності є Гн (Генрі).

Котушки індуктивності широко використовуються в якості елементів електричних кіл перш за все в техніці змінних струмів.

Значення індуктивностей котушок у колах низької частоти (50 Гц) коливаються в межах від 1 до 10 Гн, а в колах високої частоти складають декілька мілігенрі (мГн).

Приклад 3.4. Знайти індуктивність одношарової циліндричної котушки з числом витків $w = 800$, середній діаметр обмотки $d = 4\text{ см}$. І довжиною $l = 40\text{ см}$.

Розв'язання:

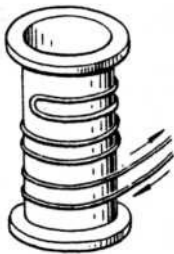
Згідно (формули 3.28), індуктивність котушки буде:

$$L = \frac{w^2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot S}{l} = \frac{800^2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0.04^2 / 4}{0.4} = 2.52 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 2,52 \text{ мГн}$$

$\mu = 1$ (для повітря).

Із всього вищевикладеного виходить, що індуктивність протидіє змінам струму у колі. Чим більша швидкість зміни струму (наприклад, при розмиканні або вмиканні ділянки електричного кола) при даному значенні індуктивності, тим сильніше індуктивність протидіє цій зміні. Через це в витках електричного кола, які утримують котушки індуктивності, стрибкоподібна зміна струму неможлива ($e_L \rightarrow \infty$).

Зміна струму в часі в таких колах залежить від значення індуктивності. Зникнення, поява, або ж зміна магнітного поля, характеризується деякою інерційністю.



Таким чином, індуктивність обумовлює інерційність процесів, що відбувається в електричному колі. Якщо потрібно мати котушки, індуктивність яких повинна дорівнювати нулю, то застосовують біфілярну намотку, тобто намотку, яка виконується дротом, складеним удвоє (рис.3.14.)

Рис. 3.14.
Котушка з біфілярною намоткою

У цьому разі у кожних двох сусідніх витках струм має протилежний напрям, що створює два зустрічних магнітних потоки, що взаємно зрівноважуються. Внаслідок цього ЕРС індукована в котушці, практично дорівнює нулю при будь-яких змінах струму.

Взаємна індукція. Якщо дві котушки знаходяться на деякій відстані (рис. 3.15) і по одній з них протікає змінний струм, то магнітне поле, яке створюється цим струмом, пронизує витки другої котушки і наводить в ній ЕРС. Це явище називається взаємоіндукцією, а ЕРС, яка при цьому виникає називається ЕРС взаємоіндукції.

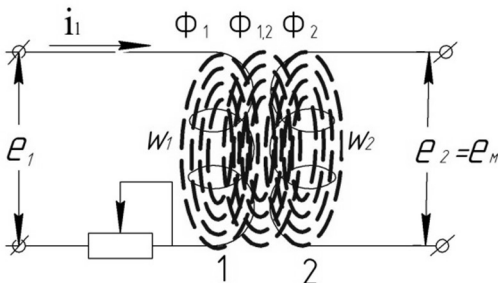


Рис. 3.15. Дві котушки зі струмом i_1 в котушці 1

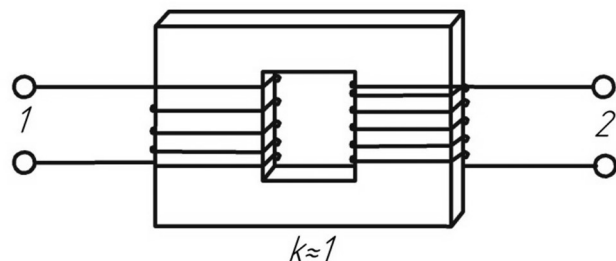


Рис.3.16. Дві обмотки на феромагнітному магнітопроводі $K \approx 1$

Якщо котушки мають число витків w_1 і w_2 відповідно, то наведена в котушці 2 в результаті взаємної індукції ЕРС e_2 буде

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_{1,2}}{dt}. \quad (3.32)$$

Додатній напрямок цієї ЕРС пов'язаний з додатнім напрямком потоку $\Phi_{1,2}$ правилом свердлика. Якщо струм i_1 , збільшується, то і потік $\Phi_{1,2}$ також зростає $d\Phi_{1,2} > 0$, а ЕРС навпаки зменшується $e_2 < 0$.

Робочий потік, що пронизує котушку 2 складає лише частину потоку Φ_1 (рис. 3.16) котушки 1, тобто,

$$\Phi_{1,2} = K_1 \Phi_1 = K_1 \frac{i_1 \cdot w_1}{R_{m1}} \quad (\text{див. формулу 3.26})$$

де R_{m1} – магнітний опір для потоку Φ_1 , і тоді ЕРС взаємної індукції в котушці 2

$$e_2 = -\frac{\kappa_1 \cdot w_1 \cdot w_2}{R_{m1}} \cdot \frac{di_1}{dt} = M_{1,2} \frac{di_1}{dt},$$

$$\text{де } M_{1,2} = -\frac{\kappa_1 \cdot w_1 \cdot w_2}{R_{m1}}.$$

Аналогічно, якщо в котушці 2 буде змінюватися струм i_2 , то ЕРС взаємної індукції в котушці 1

$$e_1 = -\frac{\kappa_2 \cdot w_2 \cdot w_1}{R_{m2}} \cdot \frac{di_2}{dt} = -M_{2,1} \frac{di_2}{dt}.$$

Із принципу взаємності випливає, що $M_{1,2} = M_{2,1} = M$.

Ця величина називається взаємною індуктивністю котушки.

ЕРС взаємної індукції

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt}, \quad e_1 = -M \frac{di_2}{dt}, \quad (3.33)$$

Якщо магнітний потік повністю охоплюється обома котушками, то взаємна індуктивність

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (3.34)$$

де L_1 і L_2 – індуктивність котушок 1 і 2 відповідно.

При неповному зв'язку котушок взаємна індуктивність

$$M = \kappa \sqrt{L_1 \cdot L_2},$$

де $\kappa = \kappa_1 = \kappa_2$ – коефіцієнт зв'язку.

Граничні значення коефіцієнта K , $K = 0$ і $K = 1$. Майже повний зв'язок ($K \approx 1$) двох обмоток досягається у випадку використання феромагнітного магнітопроводу (рис. 3.16).

Важливим представником пристрою з взаємною індуктивністю і постійним зв'язком ($M=\text{const}$) є трансформатор, який докладно описується в розділі 6 (трансформатори).

Таким чином взаємна індуктивність двох контурів чисельно дорівнює ЕРС, яка виникає у другому контурі при зміні сили струму в першому контурі зі швидкістю I А/с. Взаємна індуктивність вимірюється в одиницях генрі (Гн). Дві котушки мають взаємну індуктивність I Гн, якщо при рівномірній зміні сили струму в одній з них швидкістю I А/с у другій котушці індукується ЕРС взаємної індукції I В.

Явище взаємної індукції широко використовується в електротехніці і радіотехніці.

3.6.7. Енергія магнітного поля

Коли магніти проявляють силову дію на деталі із феромагнітних матеріалів, тобто їх притягують, вони здійснюють механічну роботу.

Наприклад, показаний на рис. 3.17 електромагніт за допомогою рухомого якоря підіймає вантаж G на деяку висоту.

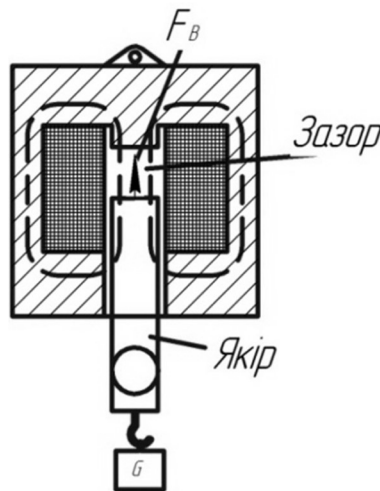


Рис. 3.17. Вантажно підіймальний електромагніт

Цілком логічним є припущення, згідно з яким робота здійснюється за рахунок зникнення магнітного поля при зменшенні повітряного зазору. При цьому необхідно вважати, що магнітне поле є носієм енергії.

Якщо магнітне поле утворюється струмом акумулятора або генератора постійного струму з ЕРС E , то енергія магнітного поля є результатом роботи джерела живлення. Припустимо, що струм у колі за час t , збільшується від нуля до свого кінцевого значення $I = E/R$. Струм у колі не тільки утворює магнітне поле, але і компенсує енергетичні затрати на нагрівання котушки.

Енергія, що отримана від джерела ЕРС E за час t_1 дорівнює:

$$W = \int_0^{t_1} E \cdot i \cdot dt. \quad (3.35)$$

Напруга на котушці після її підключення до джерела ЕРС E дорівнює цьому значенню ЕРС, тобто $U = E$, а енергія, отримана котушкою, дорівнює

$$W_K = \int_0^{t_1} u \cdot i \cdot dt. \quad (3.36)$$

З іншого боку, напруга на котушці згідно з виразом (3.30) $U = Ri + L \cdot di/dt$, і тоді енергія, отримана котушкою, буде

$$W_K = \int_0^{t_1} Ri^2 dt + \int_0^{t_1} Li \frac{di}{dt} dt, \quad (3.37)$$

де перший інтеграл – це за законом Джоуля–Ленца, частина енергії, що витрачається на нагрівання котушки;

другий інтеграл – це енергія, що накопичується в магнітному полі котушки.

Таким чином, енергія магнітного поля має вигляд:

$$W_M = \int_0^{t_1} Li \frac{di}{dt} \cdot dt = \int_0^I Lidi = \frac{LI^2}{2}. \quad (3.38)$$

Таким чином, отримано значення енергії магнітного поля котушки з індуктивністю L при струмі I в її витках.

Вираз (3.38) за формою аналогічний виразу для кінетичної енергії у механіці: $mv^2/2$, при цьому індуктивність L відповідає масі m .

В понятті індуктивність котушки знаходить свій вираз інерційність магнітного поля, тобто така його властивість, яка зазначає, що зникнення і виникнення поля не може бути миттєвим процесом, так як ЕРС самоіндукції протидіє зміні поля.

Енергія магнітного поля може бути виражена і через значення індукції і напруженості поля.

Наприклад, для котушки з кількістю витків w , магнітне поле в якій можна вважати однорідним, згідно з законом повного струму напруженість магнітного поля буде

$$H = \frac{I \cdot w}{l_{cp}},$$

де l_{cp} – довжина середньої магнітної лінії.

Отже, для струму в котушці справедливе рівняння

$$I = \frac{l_{cp} \cdot H}{w} . \quad (3.39)$$

Враховуючи рівняння (3.39) і прийнявши до уваги рівняння (3.28) перетворимо вираз (3.38) таким чином:

$$W_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{w^2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot S}{l} \cdot \left(\frac{I \cdot H}{w} \right)^2 = \frac{1}{2} \mu \cdot \mu_0 \cdot H^2 \cdot S \cdot l, \quad (3.40)$$

де S – площа поперечного перерізу котушки.

Так як $\mu \cdot \mu_0 \cdot H = B$ – магнітна індукція, а $Sl = V$ – об'єм, то енергію магнітного поля можна записати в такому вигляді:

$$W_M = \frac{B \cdot H}{2} V, \text{ або}$$

$$W_M = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} V, \quad (3.41)$$

Необхідно відмітити, що при інтегруванні в (3.48) індуктивність L розглядалась як постійна величина і через це була винесена за знак інтегралу. Проте в дійсності індуктивність постійна в тих випадках, коли також постійна магнітна проникність μ . Отже розрахунок енергії магнітного поля для феромагнітних матеріалів необхідно робити, починаючи із значення магнітного потоку.

Для цього виразимо доданок напруги $L \cdot di/dt$, тобто $U_L = -e_L$, як це виходить із (3.29), другим записом згідно з (3.15) $w \cdot d\Phi/dt$. В результаті замість (3.38) одержимо:

$$W_M = \int_0^{t_1} w \frac{d\Phi}{dt} i \cdot dt = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} i \cdot w \cdot d\Phi,$$

де Φ_1 і Φ_2 – початкове і кінцеве значення магнітного потоку.

Враховуючи, що $H = iw/l$ і $B = \Phi/S$, отримаємо

$$W_M = \int_{B_1}^{B_2} H \cdot l \cdot S \cdot dB$$

і в кінцевому вигляді

$$W_M = V \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB . \quad (3.42)$$

3.6.8. Сили, що діють в магнітному полі

В магнітному полі спостерігається три типа силової взаємодії:

- сили на межі роз'єднання матеріалів (середовищ) з різною магнітною проникністю (наприклад, повітря-сталь);
- сили, що діють на провідник зі струмом в магнітному полі;
- сили взаємодії між двома провідниками зі струмом.

Сили на межі роз'єднання матеріалів. Сили на межі роз'єднання виникають через прагнення ліній будь-якого поля (в тому числі і магнітного) пройти найкоротшим шляхом. Магнітні лінії на межі роз'єднання двох середовищ із значно різною магнітною проникністю μ , наприклад повітря – феромагнітний матеріал, практично перпендикулярні поверхні роз'єднання. Ось чому шматок магнітно м'якого заліза притягується постійним магнітом (рис.3. 18)

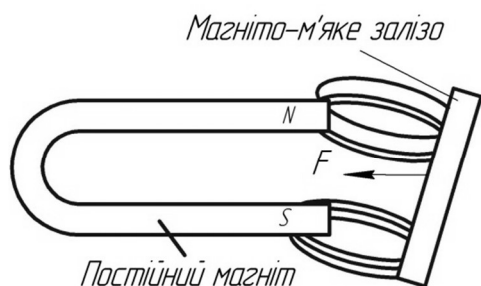


Рис. 3.18. Сили на межі роз'єднання

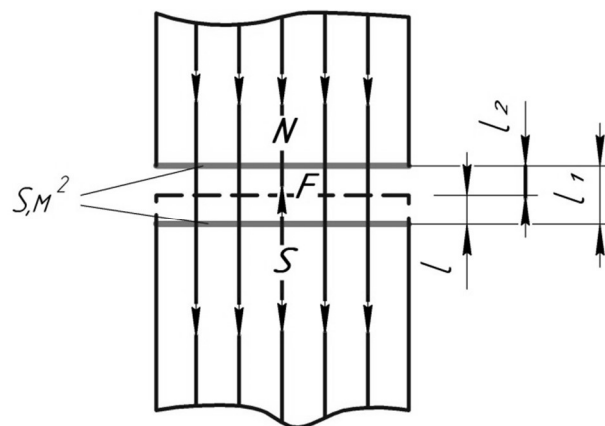


Рис. 3.19. Переміщення якоря підіймального електромагніта

У підіймальних електромагнітах використовуються сили, що виникають на межі роз'єднання в магнітному колі. Як уже відмічалось підіймальний електромагніт (рис. 3.17) здійснює механічну роботу, коли його якор втягується в корпус. На рис. 3.19 показано переміщення якоря підіймального електромагніта на висоту $l = l_1 - l_2$ в результаті чого змінюється довжина повітряного зазору в магнітному колі. При підіймальній силі F здійснюється механічна робота $F \cdot l$ за рахунок зміни енергії магнітного поля при зменшенні об'єму повітряного зазору на $l \cdot S$, де S – площа поперечного перерізу зазору.

Згідно з (3.41) енергія магнітного поля в повітряному зазорі

$$W_{1m} = \frac{B^2 \cdot l \cdot S}{2 \cdot \mu_0}$$

У тому ж об'ємі, занятому якорем, енергія магнітного поля

$$W_{2,m} = \frac{B^2 \cdot l \cdot S}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r},$$

де μ_r – відносна магнітна проникність матеріала якоря.

Якщо припустити, що при незначному переміщенні якоря індукція магнітного поля не змінюється, то зменшення енергії виразиться рівністю

$$W_{1,m} - W_{2,m} = \frac{B^2 \cdot l \cdot S}{2 \cdot \mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r} \right),$$

а так як відносна магнітна проникність матеріала якоря $\mu_r \geq 1$, то

$$W_1 - W_2 \approx \frac{B^2 \cdot l \cdot S}{2 \cdot \mu_0}.$$

Зменшення енергії магнітного поля повинно дорівнювати роботі, виконаній при підйманні вантажу, тобто

$$F \cdot l = \frac{B^2 \cdot l \cdot S}{2 \cdot \mu_0},$$

з цього рівняння одержимо вираз для підймальної сили

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0}. \quad (3.43)$$

Якщо виразити силу в ньютонках (H), магнітну індукцію в $Bб/м^2 = Тл$, а площу поперечного перерізу магнітопроводу в $см^2$ і врахувати, що $1м^2 = 10^4см^2$, то одержимо:

$$F \approx 40B^2 \cdot S. \quad (3.44)$$

Вираз (3.31) показує, що при магнітній індукції $B = 0,5 Тл$ сила тяги дорівнює приблизно $10 Н$ на $1 см^2$ площі поперечного перерізу поля. Із (3.44) випливає також, що сила тяги електромагніта зростає пропорційно квадрату магнітній індукції. Через це доцільно вибирати значення B якомога більшим, але з урахуванням насичення магнітної системи і необхідного простору, який повинна займати обмотка збудження електромагніту.

Сили, що діють в магнітному полі на межі роз'єднання середовищ, прагнуть визвати таке переміщення, при якому магнітний опір становиться мінімальним (у піднімальному електромагніті зменшується довжина повітряного зазору).

Така ж тенденція у дії сил видна на прикладі переміщення осердя з магнітно-м'якого матеріалу, поміщеного в магнітне поле котушки зі струмом (рис. 3.20).

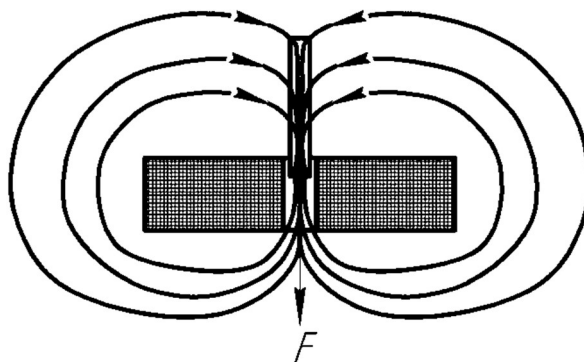


Рис. 3.20. Сили, що діють у полі котушки

Незалежно від напрямку магнітних ліній поля осердя втягуються в котушку, тобто в область поля, де магнітна індукція максимальна. Якщо осердя знаходиться всередині котушки, то магнітний опір має найменше значення. Таким чином, та ділянка поля, котра характеризується найбільшою магнітною індукцією, повністю заповнюється осердям.

Ефект втягування металевих частин в котушку, по якій протікає електричний струм, використовується в техніці електричних вимірювань – наприклад, у вимірювальних приладах електромагнітної системи.

Так як діючі в магнітному полі сили можуть бути занадто великими, то їх технічне використання має велике практичне значення, особливо в машинобудівній галузі промисловості.

В техніці сильних струмів силові властивості магнітного поля реалізуються в конструкціях таких пристроїв, як: силові електромагніти, магнітні плити кріплення, магнітні муфти, контактори, електромагнітні реле і тощо

На рис. 3.21 схематично показаний пристрій електромагнітної плити для плоскошліфувального верстата з прямокутним столом. Всередині сталюї коробчастої конструкції 1 розташовані осердя 2, на них накладені котушки 6, які з'єднані між собою послідовно і обтікаються постійним струмом. Зверху закріплюється сталюа плита 3, в якій розташовані поперек немагнітні (латунні) прокладки 5. На зовнішній поверхні столу з захватом зони 4, розташовуються деталі 7, що обробляються і які надійно притягуються до дзеркала столу, якщо по котушкам протікає струм.

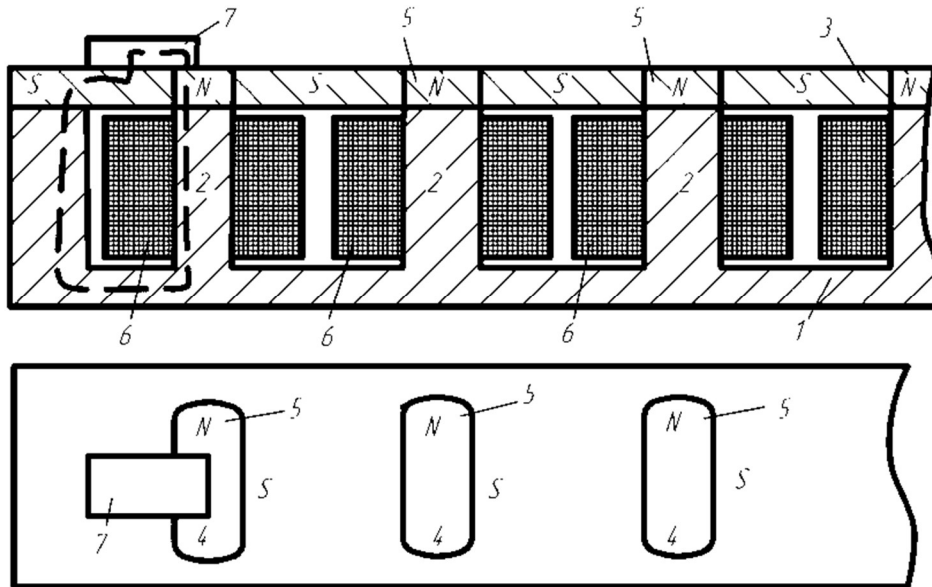


Рис. 3.21. Магнітна плита кріплення

Закріплення здійснюється тільки тоді, коли воно буде перекривати немагнітну прокладку.

Крім електромагнітних плит, для невеликих верстатів, використовуються також плити зі сталими магнітами, які мають ті переваги, по відношенню до електромагнітних плит, що в них не може бути відриву обробляючих деталей внаслідок втрати електричного живлення і вони не потребують джерела енергії.

Слід відмітити, щоб уникнути зіпсованості виробів, а також за умовами техніки безпеки в схемах управління електромагнітним столом передбачаються блокування, які забезпечують зупинку шліфувального круга при довільному розмагнічуванні стола внаслідок обриву або зникнення напруги в колі живлення котушок електромагнітів.

Негативним наслідком обробки виробів (деталей) на електромагнітному столі є обставини, в наслідок яких вироби, зняті з поверхні стола (плити), незалежно від їх конструкції зберігають залишковий магнетизм, котрий необхідно звести до мінімуму. На практиці для зменшення поля залишкового магнетизму використовуються спеціальні електричні пристрої, що називаються демагнізаторами. Схематичний пристрій демагнізатора показано на рис. 3.22,а.

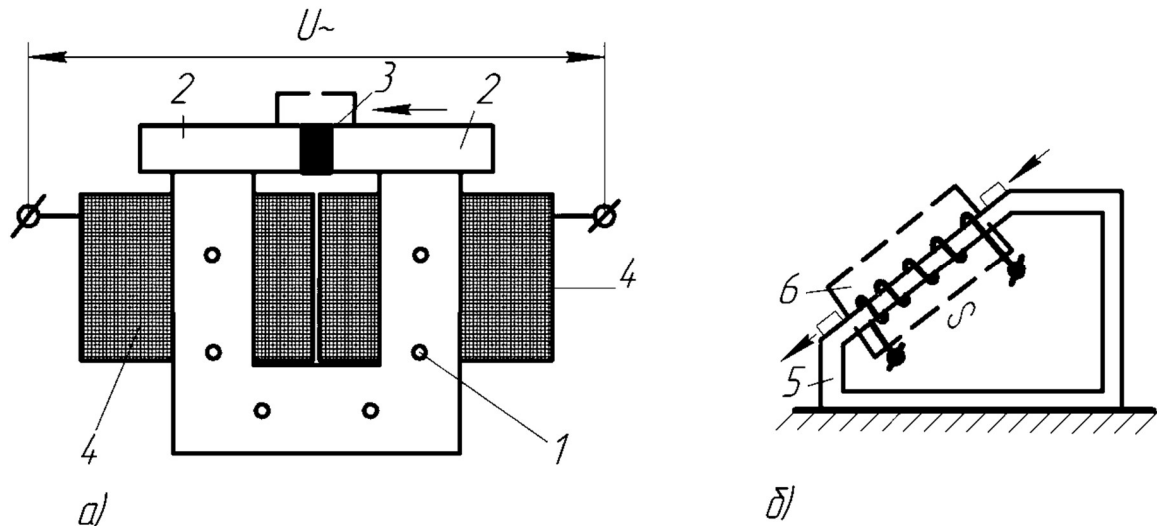


Рис. 3.22. Улаштування демагнізатора

Він складається з магнітопровода 1, виготовленого із листової електротехнічної сталі, на якому знаходяться котушки 4, що обтікаються змінним струмом. Магнітопровід у верхній частині закінчується полюсними башмаками 2 із м'якої сталі, розділеними немагнітною прокладкою 3. Для розмагнічування оброблених (намагнічений) виріб (деталь) (показано пунктиром) кладеться на полюсні башмаки і декілька разів пересувається назад і вперед. Елементарні магнітики феромагнітного матеріалу виробу, що оброблявся, зорієнтовані в певному порядку, під дією розмагнічування, приймуть попередній хаотичний стан.

У верстатах з безперервною подачею виробів використовується демагнізатор схема якого наведена на рис. 3.22, б. Тут оброблені вироби по похилому лоту – 5, виконаному із немагнітного матеріалу, проходять в магнітне поле створене котушкою – 6, що живиться змінним струмом промислової частоти (50 Гц). Такі демагнізатори зазвичай пристосовують безпосередньо до плоскошліфувальних верстатів.

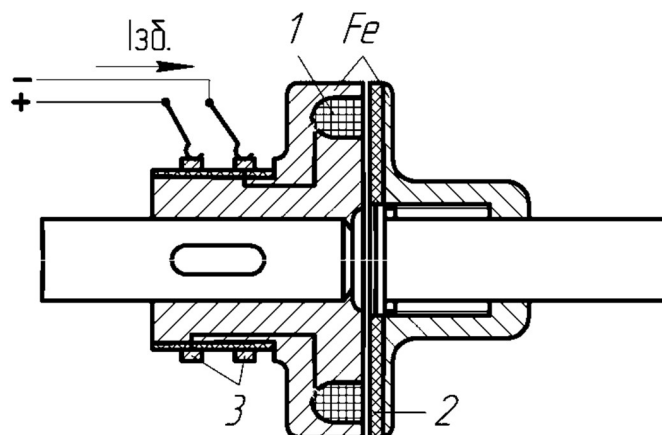


Рис. 3.23. Муфта електромагнітна

Показана на рис. 3.23 муфта електромагнітна утримує: обмотку збудження 1, фрікційне покриття 2 і контактні кільця 3 для подачі постійного струму. Магнітні муфти служать для швидкого з'єднання та роз'єднання двох валів і передачі обертального моменту із одного вала на другий. Широко використовується в машинобудуванні, на транспорті й інших галузях промисловості.

Дистанційне керування електричними колами на виробництві здійснюється з використанням електромагнітних контакторів (пускачів). Принципова схема контактора показана на рис. 3.24.

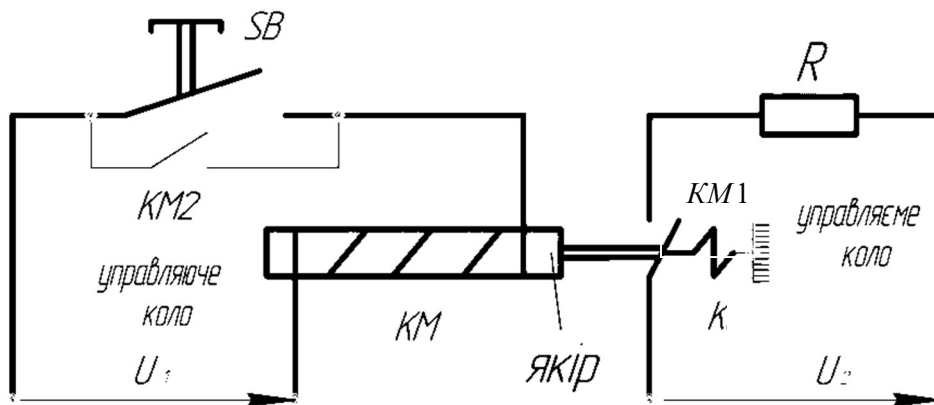


Рис. 3.24. Схема електромагнітного контактора

При натисканні на кнопку *SB* замикається управляюче коло з обмоткою котушки контактора *KM*. При цьому під дією напруги U_1 в котушці виникає магнітне поле, якір контактора втягується в середину обмотки котушки, замикаючи при цьому контакт *KM1* керуваного кола замикається і на навантаження *R* подається напруга U_2 . Замикаючий блок-контакт *KM2* блокує кнопку *SB* при її відпусканні і котушка електромагніту *KM* залишається під напругою.

За допомогою таких контакторів, при використанні незначних струмів управління в управляючому колі, можна виконувати вмикання і вимикання потужних споживачів в керуваному колі таких, наприклад, як потужні електродвигуни, потужні електричні печі і інші. При автоматичному режимі роботи з великою частотою вмикання такі вимикачі є незамінними.

Ефект втягування металевих частин в котушку, по якій протікає електричний струм, використовується: в магнітних пускачах, електромагнітних реле змінного і постійного струму, в техніці електричних вимірювань, наприклад, у вимірювальних приладах електромагнітної системи, у керуванні гідравлічними системами і в багатьох інших технічних пристроях автоматики і телемеханіки.

3.6.9. Сили, що діють на провідники зі струмом у магнітному полі

Якщо в однорідне магнітне поле накладене магнітне поле провідника зі струмом, то в середовищі поблизу провідника утворюється неоднорідне поле з різною магнітною індукцією в різних точках поля (рис.3.25). Лінії магнітного поля прямують вибирати найкоротший шлях, і через це на провідник діє сила, яка прагне перемістити його в ту область поля, де магнітна індукція мінімальна. Ця так звана електродинамічна сила має напрямок перпендикулярний магнітним лініям поля і напрямку струму в провіднику.

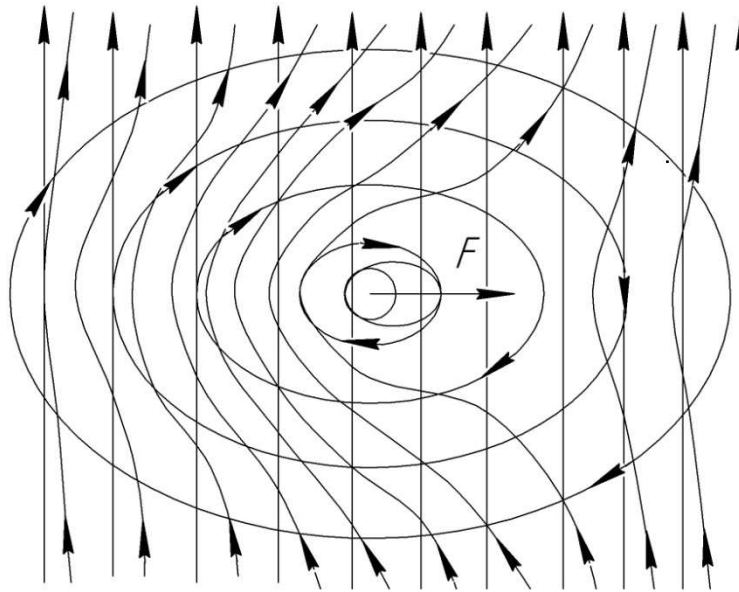


Рис. 3.25. Сумарне поле однорідного поля і поля провідника зі струмом

Для визначення напрямку дії електродинамічної сили може бути використане правило лівої руки (див. п. 3.6.4).

Силу можна розрахувати, виходячи із закону збереження енергії. Для цього необхідно порівняти електричну енергію $dW = E \cdot I \cdot dt$ механічній енергії провідника зі струмом, що рухається з постійною швидкістю $V = dS/dt$ під дією сили F

$$dW = F \cdot V \cdot dt.$$

Для розрахунку електричної енергії приймаємо до уваги співвідношення (3.25), що дає значення ЕРС індукції під час руху провідника, і одержимо

$$B \cdot l \cdot V \cdot I \cdot dt = F \cdot V \cdot dt.$$

Отже, діюча на провідник сила буде:

$$F = B \cdot l \cdot I \tag{3.45}$$

В розрахунках одержимо силу в ньютонках, якщо підставляється значення індукції в теслах, довжина провідника в метрах, а струм в амперах.

Цю закономірність ілюструє рис.3.26, на якому зображений провідник зі струмом, розташований перпендикулярно лініям магнітного поля.

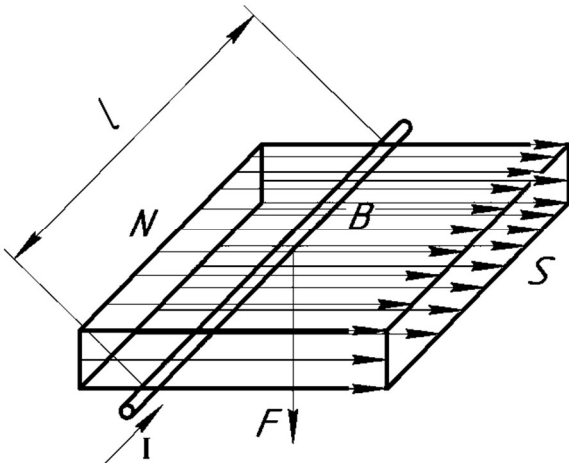


Рис. 3.26. Сила, діюча в магнітному полі на провідник зі струмом

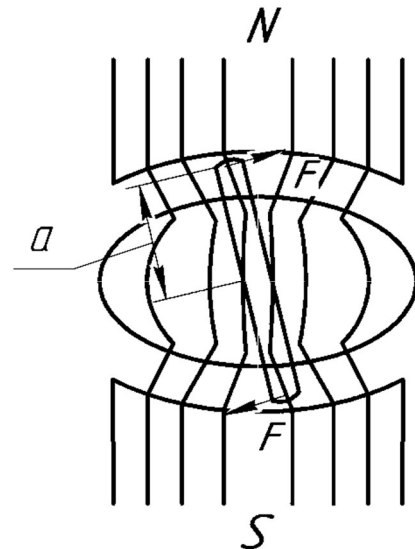


Рис. 3.27. Сили, діючі на обмотку в радіально однорідному полі

Якщо провідник розташований не перпендикулярно магнітним лініям, а під деяким кутом до них, то для електродинамічної сили справедливий вираз так як при цьому діє лише одна із двох складових магнітної індукції.

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \sin (\angle B,l) , \quad (3.46)$$

де $\angle B,l$ – кут між напрямком магнітних ліній і напрямком провідника, який приймається збігаючим з напрямком струму.

Для використання сил дії магнітного поля на провідник зі струмом в електричних приладах і машинах, головним чином, використовують не окремі провідники, а обмотки або ж сукупність провідників.

Магнітне поле називається радіально-однорідним, якщо в кожній площині, що проходить через вісь симетрії, поле має однакові характеристики. В радіально-однорідному магнітному полі на котушку, що утримує w витків, діє обертовий момент $M_{об}$ (рис. 3.27)

$$M_{об} = 2 \cdot F \cdot a = 2 \cdot B \cdot l \cdot I \cdot w \cdot a,$$

де a – радіус котушки; або

$$M_{об} = B \cdot l \cdot S \cdot w , \quad (3.47)$$

де $S = 2 \cdot a \cdot l$.

В електровимірювальних приладах цей, обумовлений дією електродинамічних сил момент урівноважується механічним моментом, який розвиває спіральна пружина. Через це відхилення рухомої системи приладу пропорційне значенню струму, що проходить по котушці.

В електродвигунах виникаючий аналогічним чином обертальний момент переборює навантажувальний момент тої машини, яку електродвигун приводить в дію. При цьому двигун обертається з незмінною швидкістю. У розділі 5 докладно описані принцип дії і конструктивне виконання електродвигунів.

Силова взаємодія провідників зі струмом (електродинамічні сили).

Якщо взяти два прямолінійних провідника, по яких протікають струми I_1 і I_2 різного напрямку, то кожний струм створює своє магнітне поле. Напрямок цих полів визначається за правилом свердлика.

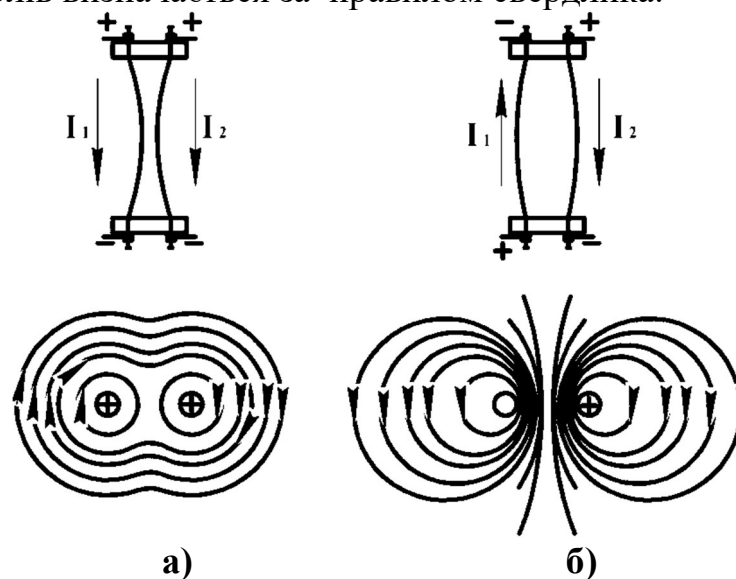


Рис. 3.28. Взаємодія провідників із струмом:

а) при однаковому напрямі струмів; б) при різному напрямі струмів

З рис. 3.28, б видно, що магнітні лінії у просторі між провідниками мають неоднаковий напрям, тому напруженість магнітного поля збільшується, внаслідок чого провідники зі струмами будуть відштовхуватись один від одного.

За однаковим напрямом струмів у провідниках рис. 3.28, а напрям магнітних ліній у просторі між провідниками різні, що призводить до зменшення напруженості поля між провідниками, тому вони взаємно притягуються. Така взаємодія провідників зі струмами називається електродинамічною. Встановлено, що сила взаємодії між паралельними провідниками зі струмами виражається формулою

$$F = \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{a} \cdot 10^{-7}, \quad (3.48)$$

де F – сила, Н;

I_1, I_2 – струм відповідно в одному і другому провідниках, A ;

a – відстань між провідниками, m ;

l – довжина кожного провідника, m .

Електродинамічна дія струму використовується у вимірювальних приладах – ватметрах і лічильниках.

Приклад 3.5. При короткому замиканні в електричному колі великої потужності струм занадто великий його електродинамічна дія повинна бути нейтралізована конструктивними засобами. Ця задача повинна дати уявлення про сили, що виникають в таких випадках.

Визначити силу взаємодії на кожний метр довжини провідників у випадку двох паралельних провідників, що знаходяться на відстані 5 см один від одного при струмі короткого замикання рівного 40000 А.

Розв’язання: За формулою (3.48) сила взаємодії двох паралельних провідників на кожний метр їх довжини ($l=1m$)

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} \cdot I^2 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{1}{0.05} (4 \cdot 10^4)^2 = 6400 \text{ Н/м.}$$

Кріплення провідників (наприклад, за допомогою збірних шин прямокутного перерізу), утримуючих їх від силової взаємодії струмів повинно за час короткого замикання витримати ці великі навантаження ударного характеру.

3.7. Теплова дія струму в електромагнітних пристроях та протипожежні заходи

Кожний електромагнітний пристрій для виконання функціонального призначення має у своєму складі магнітопровід (осердя) і котушку намагнічування.

Магнітний потік котушки без сталюого осердя зростає прямо пропорційно струмові, який його спричиняє. Якщо, наприклад, силу струму збільшити у 2 рази, то і магнітний потік збільшиться у 2 рази. Якщо котушка розміщена на осерді з феромагнітного матеріалу, то інтенсивність магнітного поля зростає у сотні, тисячі та більше разів при такому самому струмі котушки. Отже, у котушці з осердям зростає інтенсивність магнітного поля і порушується пропорційність між магнітним полем котушки і струмом.

Ще в 1872 р. професор Московського університету О.Г. Столетов досліджував магнітні властивості сталі при зміні напруженості магнітного поля, у якому вміщувалась сталь. Напруженість магнітного поля змінювалась із зміною струму в котушці, що створює магнітне поле. Дослідним шляхом О.Г. Столетов одержав криву залежності магнітної

індукції котушки зі сталевим осердям від напруженості магнітного поля (рис.3.38, а)

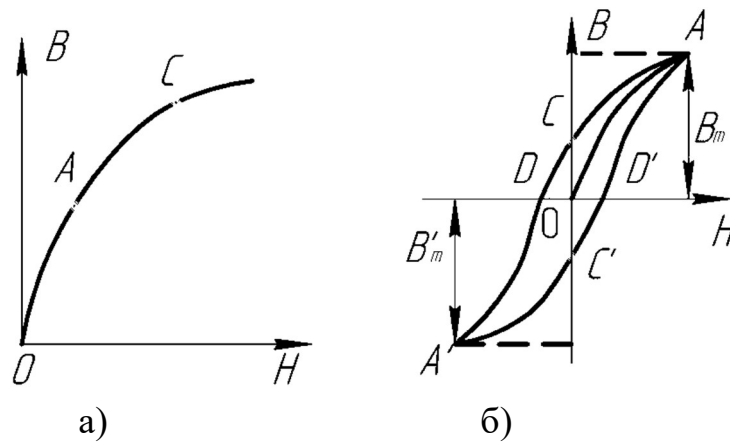


Рис. 3.29. Криві намагнічування:
а – початкового; б – циклічного (петля гістерезису)

Графік цієї залежності називається кривою початкового намагнічування. Криву початкового намагнічування можна розділити на три ділянки: початкову ОА, на якій магнітна індукція зростає майже пропорційно напруженості магнітного поля; ділянку АС, на якій зростання магнітної індукції сповільнюється (коліно кривої намагнічування); кінцеву ділянку за точкою С, яка характеризується повільною зміною магнітної індукції при збільшенні напруженості магнітного поля. Остання ділянка кривої початкового намагнічування відповідає так званому магнітному насиченню сталевго осердя, тобто такому стану, коли об'єм осердя повністю заповнений магнітними силовими лініями і більше магнітних ліній осердя прийняти не в змозі.

З графіка видно, що залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля нелінійна, а отже, магнітна проникність ферромагнітних матеріалів $\mu = \frac{B}{H}$ не постійна за величиною і залежить від величини напруженості магнітного поля, а напруженість поля залежить від параметрів котушки і величини струму, що по ній протікає

$$H = \frac{I \cdot w}{l_{cp}}$$

Якщо по котушці протікає струм, що змінюється за величиною і напрямом, то при збільшенні сили струму магнітна індукція В буде доведена до максимального значення B_m , яке відповідає магнітному насиченню осердя (рис. 3.29, б).

Із зменшенням струму котушки магнітна індукція зменшується, але по іншій кривій (відповідає спаду струму).

Явище відставання змін магнітної індукції від відповідних змін напруженості магнітного поля називається магнітним гістерезисом. При циклічному перемагнічуванні феромагнітного матеріалу ця залежність графічно виражається замкненою кривою, що називається петлею гістерезиса (рис. 3.29, б).

Залежно від розмірів і форми петлі гістерезису розрізняють матеріали магнітом'які і магнітотверді. Магнітом'які матеріали мають вузьку петлю гістерезису, магнітотверді – широку.

За перемагнічуванням сталі витрачається енергія, яка, перетворюючись у тепло, нагріває осердя.

Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, що витрачається при одному циклі перемагнічування.

Якщо магнітну індукцію виразити в $Tл = Bб/м^2 = B·с/м^2$, а напруженість поля – в $A/м$, то площа петлі гістерезису буде виражатися в $B · A · с/м^3 = Дж/м^3$. Отже, площа петлі гістерезису чисельно дорівнює енергії, що витрачається за один цикл перемагнічення одиниці об'єму феромагнетика.

Витрати енергії, пов'язані з процесом перемагнічування, називаються витратами на перемагнічування або витратами через гістериз.

Витрати енергії, як відомо, прямо пропорційні квадрату струму. Отже, при відповідних умовах, коли струм у колі котушки збільшується, осердя магнітопроводу може нагріватись до високої температури і може стати джерелом запалювання.

Для зменшення некорисних витрат на перемагнічування та зниження пожежонебезпечності необхідно слідкувати за заданим режимом роботи котушок і не допускати збільшення номінального струму.

Велике значення при проектуванні та виготовленні електромагнітних пристроїв має правильний вибір матеріалу для магнітопроводів.

Для виготовлення осердь електромагнітних апаратів, електричних машин і трансформаторів, що працюють на частоті мережі 50 Гц, застосовують магнітом'які матеріали – електротехнічні сталі марок: Е11, Е21, Е31, Е41 і інші. Буква Е – електротехнічна сталь; цифри 1,2,3,4, що стоять на першому місці за буквою Е, зазначають ступінь легування сталі кремнієм (силіцієм):

1 – слабколегована сталь ($Si = 0.8 - 1.8 \%$);

2 – середньолегована сталь ($Si = 1.8 - 2.8 \%$);

3 – підвищенолегована сталь ($Si = 2.8 - 3.8 \%$);

4 – високолегована сталь ($Si=3.8 - 4.8\%$). Магнітотверді

матеріали застосовуються для виготовлення постійних магнітів.

Другим фактором, що викликає нагрівання магнітопроводів під дією змінного магнітного поля, є так звані вихрові струми. Дійсно, у

відповідності з законом електромагнітної індукції при зміні магнітного потоку в магнітопроводі повинні наводитися змінні ЕРС, під дією яких в магнітопроводі протікають струми i_v , що називаються вихровими. Площина, в котрій замикаються вихрові струми, перпендикулярна, напрямку магнітного потоку (рис. 3.39).

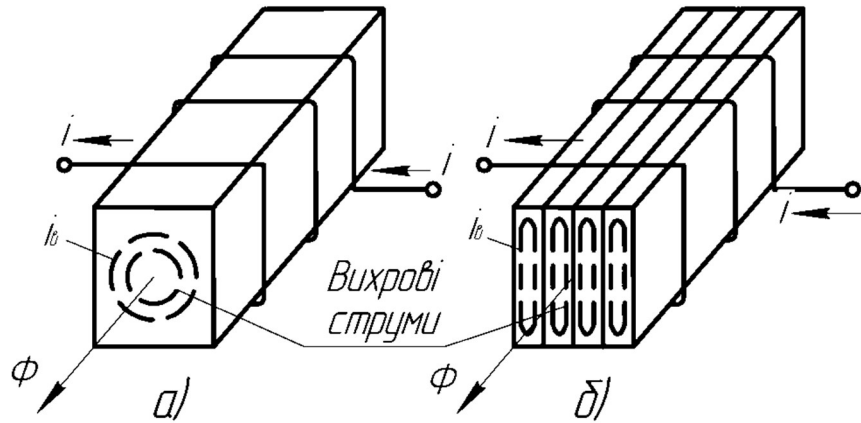


Рис. 3.39. Магнітопровід з вихровими струмами

Як відомо, будь-який струм нагріває провідник, по якому він протікає. Тому вихрові струми також нагрівають магнітопроводи.

Сумарна потужність втрат називається магнітними втратами або втратами в сталі. Питомі втрати в сталі (втрати в одиниці маси) нормуються державним стандартом і для електротехнічної сталі при частоті 50 Гц складають $0,9 - 5,8 \text{ Вт/кг}$ при індукції 1 Тл і $0,95 - 13,4 \text{ Вт/кг}$ при індукції $1,5 \text{ Тл}$.

Втрати в сталі зменшують ККД електричних машин і апаратів, і визивають нагрівання магнітопроводів. Для зменшення втрат магнітопроводи пристроїв із змінним магнітним потоком виробляють із спеціальної електротехнічної сталі, леговані кремнієм (див. вище). Кремній збільшує питомий електричний опір сталі. Великий питомий опір сталі ($(10-60) \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) забезпечує зменшення вихрових струмів i_v отже, втрат. Крім того, для зменшення вихрових струмів електротехнічна сталь виробляється у вигляді тонких листів або стрічок (для частоти 50 Гц – товщиною $0,35-0,5; 0,65 \text{ мм.}$), із яких набираються магнітопроводи. Переріз магнітопроводу таким чином розбивається на ряд ізольованих між собою півкою лаку, окалиною, спеціальним папером або іншим матеріалом (рис.3.39, б). Довжина шляху і опір для вихрових струмів значно збільшується, а самі струми і втрати зменшуються.

Найбільш серйозним пошкодженням сталі в електромагнітних механізмах, особливо в трансформаторах, що може привести до пожежі є так звана «пожежа сталі». Це таке пошкодження сталі осердя, при якому через порушення ізоляції між окремими листами сталі, або стягуючими їх

болтами виникають сильні місцеві нагрівання сталі вихровими струмами, що призводять до руйнування їх ізоляції і пошкодження (вигорання) сталі осердя. Така ситуація є пожежонебезпечною як для електромагнітного пристрою, так і оточуючого середовища.

Як показує практика, значну пожежну небезпеку мають котушки електромагнітних пристроїв. Котушка слугує для утворення магнітного потоку, який створює рушійні електромагнітні чи механічні сили для роботи пристрою.

Пожежна небезпека пояснюється надмірним підвищенням температури деталей пристрою, яка відбувається в результаті міжвиткових замикань в котушках, послабленням контактних з'єднань, забрудненням і нещільним контактом рухомої частини магнітопроводу й інших контактних поверхонь. Експериментально встановлено також, що причиною перегрівання котушок може слугувати навіть незначне (на 5 % вище номінальної) підвищення напруги понад допустимої величини.

Нерідко пожежі в електромагнітних пристроях виникають в результаті коротких замикань проводів на корпус в містах їх вводу.

У процесі експлуатації електромагнітної системи, як і в будь-якому електричному апараті, окремі вузли і деталі зношуються і виходять із ладу. Відбувається порушення регулювань, послаблюються контакти і тощо Все це при відповідних умовах може призвести до надмірного нагрівання проводу обмотки котушки та займання ізоляції і всієї котушки.

Треба мати на увазі, що котушки однакових розмірів виготовляються на різні напруги: змінної – 36, 110, 220, 380, 660 В; і постійної – 6, 12, 24, 36, 48, 60, 110, 220 і 440 В. Через це котушки нових пристроїв необхідно перевіряти на відповідність напруги, на яку вони розраховані і виготовлені, напрузі мережі, що можна зробити по етикетці на загальній ізоляції обмотки котушки. Те ж саме робиться і при заміні котушки, що вийшла із ладу. При цьому не слід забувати, що в коло постійного струму не можна вмикати котушки, що розраховані на роботу в колі змінного струму. Неправильна заміна котушки на один і той же рівень напруги обов'язково призведе до загорання ізоляції обмотки котушки і до пожежі в електричному колі.

Основними пожежо-профілактичними заходами при експлуатації електромагнітних пристроїв є систематичний нагляд обслуговуючого персоналу за їх струмонавантаженням та станом рухомих частин приладу, своєчасно виявляти та усувати всі несправності в роботі окремих вузлів і деталей. Регулярно проводити заходи, що передбачені планово-попереджувальним ремонтом. У першу чергу необхідно звертати увагу на місця і вузли, що здатні нагріватися і за відповідних несприятливих умов можуть привести до виникнення джерела запалювання. За графіком

регулярно контролювати опір ізоляції обмотки котушки відносно корпусу, який повинен мати величину не менше 0,5 МОм.

Запитання та завдання для самоконтролю

1. Приведіть основні параметри та залежності, що характеризують електричне поле.
2. Охарактеризуйте провідники та ізоляційні матеріали, що використовуються в сучасних електричних пристроях і установках.
3. Хто із вчених-фізиків вперше запропонував і використав на практиці ізоляцію проводів?
4. Поясніть, що таке електрична міцність та нагрівальна стійкість електричної ізоляції, яке практичне значення вони мають?
5. Поясніть електричні характеристики конденсаторів та їх особливості в колах постійного та змінного струмів.
6. Дайте характеристику природних і штучних магнітних явищ, приведіть основні величини, що характеризують магнітне поле.
7. Сформулюйте основні закони магнітних кіл, та проведіть їх аналіз.
8. Наведіть аналогію між електричними і магнітними колами.
9. Сформулюйте закон електромагнітної індукції та наведіть приклади практичного його використання в сучасній електро- та радіотехніці.
10. Що таке індуктивність котушки? Одиниця виміру індуктивності, як вона визначається?
11. Поясніть явища самоіндукції і взаємної індукції?
12. Вкажіть особливості енергії електричного і магнітного полів. Приведіть приклади їх використання.
13. Визначити енергію електричного поля конденсатора ємністю 10 мкФ при напрузі 220 В. яку роботу необхідно виконати джерелу напруги, щоб перезарядити конденсатор до такого ж рівня напруги але протилежного знака? Відповіді: 0,242 Дж і 0,484 Дж.
14. Котушка з опором 10 Ом та індуктивністю 10 мГн підключена до джерела постійної напруги 100 В. визначити енергію магнітного поля котушки після включення. Як зміниться енергія, якщо котушку підключити до джерела 200 В? Відповіді: 0,5 Дж і 2 Дж.
15. Магнітний потік, що утворюється в магнітному колі обмоткою з кількістю витків 400 при струмі 2 А, складає $2 \cdot 10^{-4}$ Вб. Визначити магнітний опір кола. Чому буде дорівнювати магнітний потік при струмах 1 А та 3 А.

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

4.1. Загальні відомості про змінний струм.

Вперше виникла потреба у великій кількості електроенергії у зв'язку із запровадженням освітлення вулиць та майданів за допомогою дугових ліхтарів. Першу дугову лампу з ручним регулюванням довжини дуги сконструював в 1848 році французький фізик Фуко. У 1848 році він вперше використав дугову лампу для освітлення одного з паризьких майданів. Це був короткий і надто дорогий дослід, оскільки джерелом живлення була потужна батарея постійного струму. Потім були придумані різноманітні за конструкціями дугові лампи з часовими механізмами, котрі автоматично зсували вугільні електроди в міру їх згорання.

Зрозуміло, що з точки зору практичного використання такі лампи не могли задовольнити споживачів і вони не знайшли широкого розповсюдження.

У 1876 році електротехнік П.М. Яблочков винайшов дугову лампу, яка одержала назву «свічка Яблочкова».

Павло Миколайович Яблочков (1847-1894) – електротехнік і винахідник увійшов в історію техніки як автор «свічки Яблочкова». У



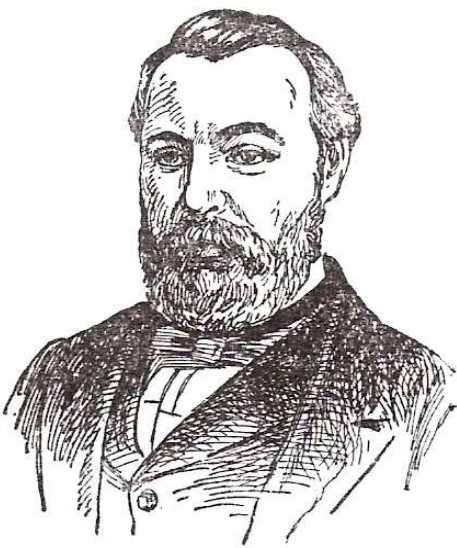
1876 р. одержав патент на винахід електричної свічки – дугової вугільної лампи змінного струму. Вперше застосував багатофазний генератор змінного струму для живлення установок електричного освітлення. Він розробив розподільчу систему електричної енергії змінного струму за допомогою найпростіших трансформаторів із розімкненим магнітопроводом. Він також вперше запропонував подрібнення електричної енергії змінного струму за допомогою трансформаторів.

Конструкція «свічки Яблочкова» дуже проста: дві вугільні пластини Яблочков розташував не одна проти одної, як це було у попередніх конструкціях, а паралельно, притому, між пластинами помістив ізоляційну прокладку з гіпсу. Остання виконувала подвійну роль, оскільки служила і для скріплення вугільних пластин між собою, і для їх ізоляції, дозволяючи вольтовій дузі утворюватися тільки між верхніми кінцями вугільних пластин. В міру того, як вугілля зверху обгоряло, гіпсова пластинка плавилася і випаровувалася, так, що кінчики вуглинок завжди на декілька міліметрів виступали над гіпсовою пластиною.

Свічки Яблочкова привернули до себе загальну увагу. У 1877 році за допомогою цих свічок було облаштовано освітлення центральної вулиці Парижа.

Всесвітня виставка, що відкрилась в Парижі в 1878 році, дала можливість електротехнікам із багатьох країн ознайомитись з цим видатним винаходом. Під назвою "свічки Яблочкова", які використовувались пізніше для освітлення вулиць у багатьох містах світу.

Ці лампи цікаві ще й тим, що вимагали для себе виключно змінного струму, тому що швидкість згоряння плюсового і мінусового електродів у них, була неоднаковою і, при постійному струмі необхідно було виготовляти плюсовий електрод товстішим. Саме тому для живлення «свічок Яблочкова» французький винахідник Грамм виготовив свій перший генератор змінного струму.



Грамм Зеноб Теофіл (1826-1901 рр.)

– співробітник французької машинобудівельної компанії «Альянс».

Винайшов електричний генератор, як динамо-машину постійного струму із самозбудженням і кільцевим якорем (1870 р.). Ця машина була першим генератором промислового типу, яка дала можливість легко і швидко перетворювати механічну енергію в електричну.

На початку 80-х років 19 ст., коли виросла зацікавленість у змінному струмі, Грамм побудував перший генератор змінного струму, принцип роботи якого використовується і по сьогоднішній день.

Разом з перевагами, «свічки Яблочков» мали свої недоліки. Головною незручністю було те, що вуглини в них згоряли дуже швидко – свічка середньої величини світила не більше двох годин. Але не тільки, справа в тому, що після розповсюдження «свічки Яблочкова» в Європі, електротехніки зіткнулись із так званою проблемою «подрібнення» електричної енергії. Вона полягала в тому, що, як правило, від однієї генераторної установки повинна була живитись велика кількість лампочок. Між тим, при послідовному з'єднанні багатьох свічок, режим роботи мережі ставав нестійким. Затухання тільки однієї свічки було рівнозначним розриву мережі, після чого гасла і решта свічок. Якщо свічки вмикались у коло паралельно, то як правило, загорялася тільки та з них, опір якої був найменшим (через те, що струм, як відомо, проходить завжди по лінії найменшого опору). Коли ця свічка повністю вигорала, то загорялася наступна, опір якої був найменшим, і так далі. Зіткнувшись з цією проблемою, Яблочков запропонував використовувати для «подрібнення» енергії індуктивні котушки, (які стали прообразом майбутніх трансформаторів). При такому з'єднанні в коло послідовно

вмикались первинні обмотки котушок, а у вторинну обмотку, в залежності від її параметрів, могли вмикатися одна, дві, три і більше свічок. Котушки працювали при цьому в режимі трансформатора і видавали на виході необхідну напругу. При затуханні лампи коло не переривалося і окремі свічки продовжували горіти. З розвитком техніки змінних струмів трансформатори набули важливого практичного значення.

Котушки, запропоновані Яблочковим, були з розімкненим магнітопроводом у вигляді окремих стрижнів, а тому мали невеликий ККД. Перший більш досконалий трансформатор з замкненою магнітною системою був створений в 1884 році англійськими винахідниками братами Джонсом і Едуардом Гопкінсонами.

У 1885 році угорський електротехнік Дері довів, що трансформатори повинні вмикатися в коло паралельно, і взяв патент на цей спосіб з'єднання. Тільки після цього почалося промислове виробництво трансформаторів однофазного змінного струму.

У 1889 році електротехнік М. Й. Доліво-Добровольський винайшов трифазний трансформатор з радіальним розташуванням стрижнів, а у жовтні 1891 року він взяв патент на трифазний трансформатор з паралельними стрижнями, розташованими в одній площині. Його конструкція виявилась настільки вдалою, що без принципів змін збереглася до наших днів.

Використання трансформаторів дало можливість розв'язати головну енергетичну проблему кінця XIX століття – проблему централізації виробництва електроенергії і передачі її на великі відстані. Завдяки трансформації змінного струму, стало можливим від далекої електростанції підвести електропостачання до кожного окремого цеха, а потім і окремому верстату.

На сьогодні виробництво, передача, розподіл та споживання електроенергії у всьому світі відбувається переважно змінним синусоїдним струмом як найбільш простим у виробництві та найбільш економічним у передачі та споживанні.

4.2. Лінійні кола однофазного синусоїдного струму

4.2.1. Отримання синусоїдної електрорушійної сили (ЕРС) та основні характеристики синусоїдних електричних величин

Найбільш широкого застосування в енергетиці одержали змінні напруги і струми, що являють собою періодичні функції часу. Електричні кола, в яких ЕРС, напруга і струми змінюються в часі за синусоїдальним законом, називаються колами змінного синусоїдного струму. Значення змінного струму, ЕРС і напруги у будь-який заданий момент часу, називається миттєвим значенням. Миттєві значення позначаються малими

буквами i , e , u . Напрямок змінного струму, для якого його миттєве значення позитивне, приймається позитивним.

Основними перевагами синусоїдних струмів є те, що вони дозволяють найбільш економічно здійснювати виробництво, передачу, розподіл і споживання електричної енергії. Доцільність їх використання обумовлена тим, що коефіцієнт корисної дії генераторів, електричних двигунів, трансформаторів і ліній електропередач у цьому випадку виявляється найвищим. Крім того, розрахунок кіл з синусоїдальними ЕРС, напругами і струмами значно простіше, ніж розрахунки з несинусоїдальними величинами.

В енергетиці, як правило, використовують синусоїдні струми, котрі, зазвичай, називають змінними. У сферах зв'язку, електроніці, телемеханіці, використовують несинусоїдні струми, наприклад, імпульсні. Отже, змінні ЕРС, напруги і струми, можуть бути різними, але серед них найбільш часто використовують періодичні.

Періодичними називаються такі ЕРС, напруги і струми, миттєві значення яких повторюються в однаковій послідовності, через рівні проміжки часу (рис. 4.1, а)

Найбільша з миттєвих значень величина називається максимальною, або амплітудною. Максимальні значення позначаються великими літерами з індексом m : E_m , U_m , I_m .

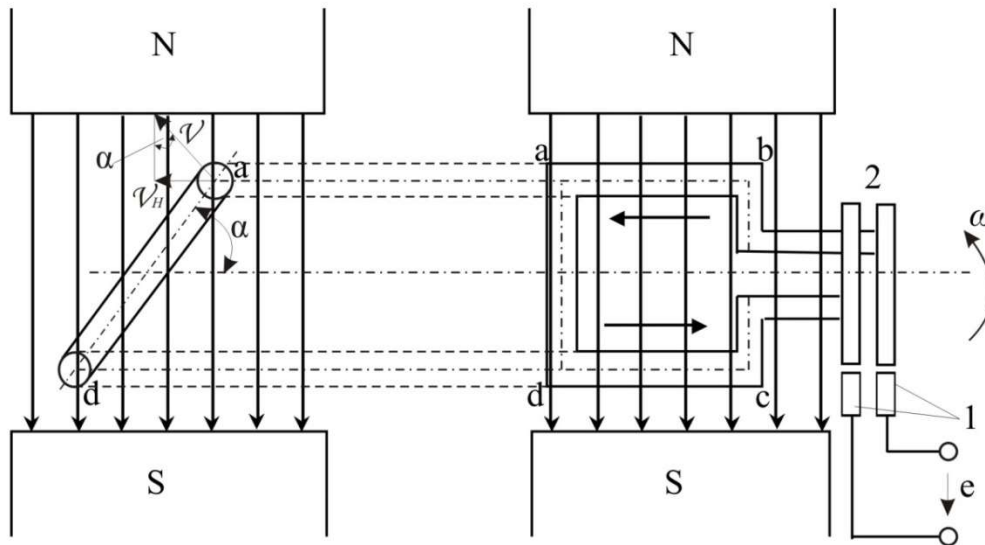
Найменший проміжок часу, протягом якого змінний струм виконує повний цикл змін за синусоїдою, називається періодом змінного струму і позначається буквою T . Період вимірюється в секундах і, як правило, становить частки секунди.

Величина, обернена періодові, тобто кількість періодів в секунду, називається частотою змінного струму, і позначається буквою f :

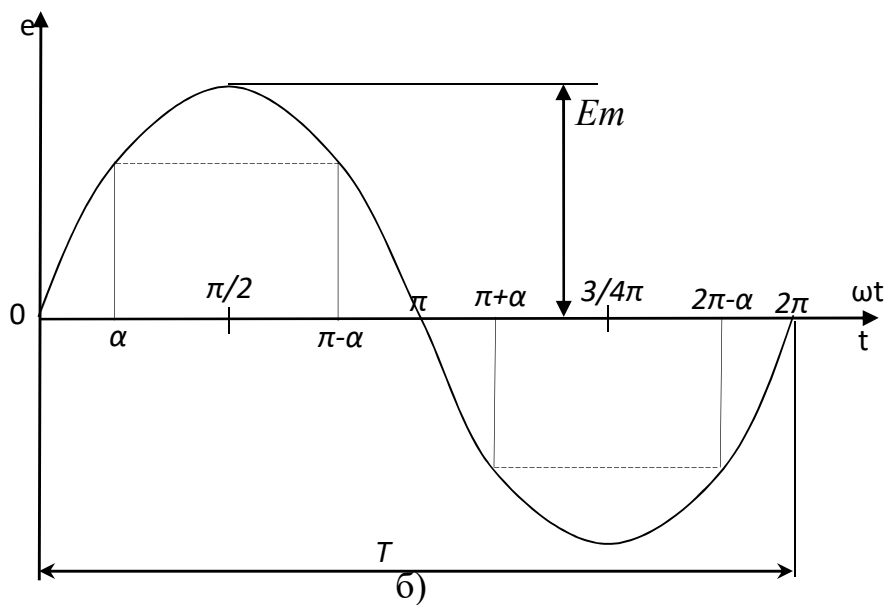
$$f = \frac{1}{T}. \quad (4.1)$$

За одиницю вимірювання частоти змінного струму прийнятий 1 Герц.

Одиниці частоти присвоєно найменування «Герц» на честь німецького фізика Г. Герца (1857 – 1894 рр.).



а)



б)

Рис. 4.1. Генерування та форма синусоїдної ЕРС:
а) найпростіший генератор синусоїдної ЕРС;
б) графічна форма синусоїдної ЕРС

1 Герц – це частота, яка дорівнює числу періодів змінної ЕРС в одну секунду. Стандартною промисловою частотою змінного струму є частота 50 Гц (в США, Канаді і Японії – 60 Гц). Отже, при частоті $f = 50 \text{ Гц}$, період синусоїдного струму

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с}.$$

Для вимірювання великих частот використовують одиниці: кілогерц (кГц) і мегагерц (МГц):

$$1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц};$$

$$1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}.$$

Синусоїдна ЕРС виникає в генераторах змінного струму внаслідок явища електромагнітної індукції. Будова найпростішого генератора синусоїдної ЕРС схематично показана на рис. 4.1, а.

Прямокутна рамка (котушка) з мідного дроту рівномірно обертається в однорідному магнітному полі, з кутовою швидкістю ω . Пронизуючий котушку магнітний потік під час обертання котушки $abcd$ індукує в ній на підставі закону електромагнітної індукції ЕРС e . Навантаження підключають до генератора за допомогою щіток 1, що придавлюються до двох контактних кілець 2, які, в свою чергу, з'єднані з витками котушки. Значення, індукване в котушці $abcd$, ЕРС, в кожний момент часу пропорціональне магнітній індукції B , розміру активної частини котушки $l = ab + dc$ і нормальній складовій швидкості переміщень її, відносно поля V_{\perp} :

$$e = B l V_{\perp}, \quad (4.2)$$

де B і l – постійні величини, а V_{\perp} – змінна, і залежить від кута α . Якщо виразити швидкість V_{\perp} через лінійну швидкість котушки V_{\perp} , одержимо:

$$e = B l V_{\perp} \sin \alpha. \quad (4.3)$$

У виразі (4.3) добуток $e = B l V_{\perp} \sin \alpha = \text{const}$ Отже, ЕРС, що індукується в котушці, яка обертається в магнітному полі, є синусоїдальною функцією кута α .

Якщо кут $\alpha = \pi / 2$, то добуток $B l V_{\perp}$ в формулі (4.3) – є максимальне (амплітудне) значення індукваної ЕРС, $E_m = B l V_{\perp}$ через це вираз (4.3) можна записати у вигляді:

$$e = E_m \cdot \sin \alpha. \quad (4.4)$$

Так як α – кут повороту за час t , то виразивши його через кутову швидкість ω , можна записати:

$$\alpha = \omega t,$$

звідки,

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \frac{1}{T} = 2\pi \cdot f. \quad (4.5)$$

Кутова швидкість ω вимірюється у радіанах за секунду $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ або $\frac{1}{\text{с}}$.

При частоті $f = 50 \text{ Гц}$:

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}. \quad (4.6)$$

Враховуючи, що $\alpha = \omega t$, формулу (4.4) можна переписати у вигляді:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t, \quad (4.7)$$

де e – миттєве значення ЕРС в котушці; $\alpha = \omega t$ – фаза, що характеризує значення ЕРС в даний момент часу.

Синусоїдні величини можна графічно зображати за допомогою синусоїд або обертових векторів (рис.4.2.). При зображенні їх синусоїдами на ординаті, в відповідному масштабі, відкладають миттєві значення величин (на абсцисі – час). Якщо синусоїдальну величину зображають обертовими векторами, то довжина вектора в масштабі відображає амплітуду синусоїди; кут, створений з додатним напрямком вісі абсцис, в початковий момент часу, дорівнює початковій фазі, а швидкість обертання вектора дорівнює кутовій частоті. Миттєві значення синусоїдних величин – проекція обертового вектора на вісь ординат. Необхідно відмітити, що позитивним напрямком обертання радіуса – вектора прийнято вважати напрямок обертання проти напрямку руху годинникової стрілки відносно позитивної осі абсцис, негативні – у напрямку руху годинникової стрілки.

На рис. 4.2 побудовані: а) – графіки миттєвих значень ЕРС e і e' ; б) – векторні зображення максимальних значень ЕРС E_m і E'_m .

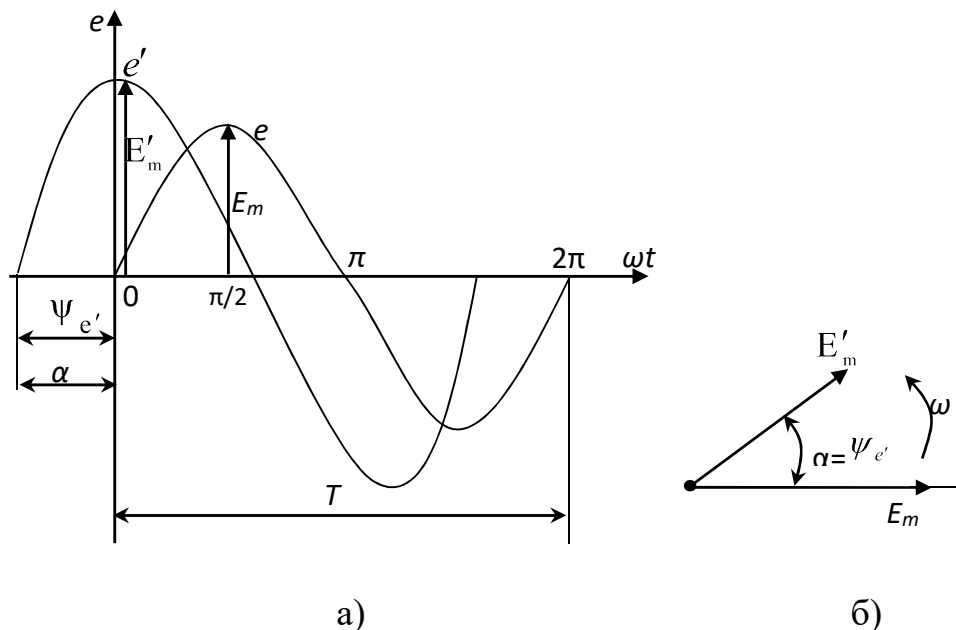


Рис. 4.2, а). Графіки миттєвих значень e і e' ; **б)** векторні зображення максимальних значень E_m і E'_m .

Графічно зображені на рис 4.2. ЕРС e і e' , можна описати виразами:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t ; e' = E'_m \cdot \sin(\omega t + \psi_{e'}) .$$

Тут ωt і $\omega t + \psi_e$ – фази, що характеризують значення ЕРС e і e' в заданий момент часу; ψ_e – початкова фаза, що визначає значення ЕРС e' при $t = 0$. Для ЕРС e початкова фаза дорівнює нулю ($\psi_e = 0$).

Кут ψ – завжди відраховують від нульового значення синусоїдної величини при переході її від від'ємних значень до додатних, до початку координат ($t = 0$). При цьому, додатну початкову фазу буде мати та синусоїда, яка при переході від від'ємних значень до позитивних, перетинає вісь часу лівіше відносно початку координат ($t = 0$) (дивись рис. 4.2.); і навпаки – синусоїда, що перетинає вісь часу, при переході від від'ємних до додатних значень, правіше відносно початку координат ($t = 0$), буде мати від'ємний кут початкової фази.

Відстає за фазою та з двох синусоїдних величин, котра при переході від від'ємних значень до позитивних, пізніше (правіше) перетинає вісь абсцис.

Якщо у двох або декількох синусоїдних величин, що змінюються з однаковою частотою, початки синусоїд не збігаються в часі, то вони мають зсув одна по відношенню до другої за фазою, тобто вони не співпадають по фазі.

Різницю кутів ψ , що дорівнює різниці початкових фаз, називають кутом зсуву фаз. Зсув фаз між однойменними синусоїдними величинами, наприклад, між двома ЕРС або двома струмами, позначають буквою α .

Кут зсуву фаз між синусоїдами струму і напруги, або їх максимальними векторами, позначають буквою φ , як показано на рис. 4.3.

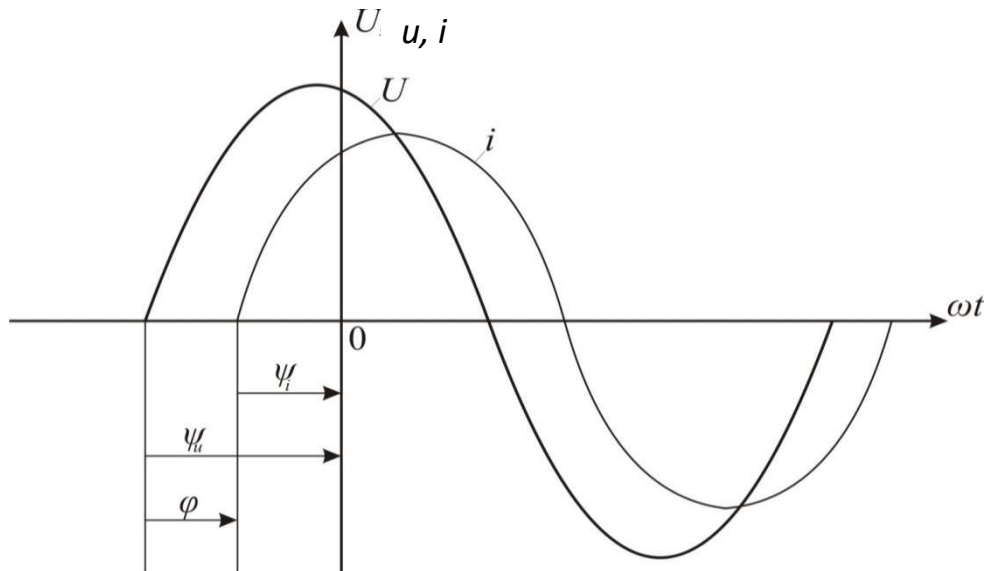


Рис. 4.3. Зсув фаз між струмом і напругою

Коли для синусоїдних величин різниця фаз дорівнює $\pm \pi$, то вони протилежні за фазою, якщо ж різниця фаз дорівнює $\pm \pi/2$, то кажуть, що вони знаходяться в квадратурі. Якщо для синусоїдальних величин однієї

частоти початкові фази однакові, то це означає, що вони співпадають за фазою.

Для синусоїдних значень напруги і струму, графіки яких представлені на рис.4.4, кут зсуву фаз дорівнює нулю ($\varphi=0$) і початкові фази, природно, також дорівнюють нулеві ($\psi_i=\psi_u=0$).

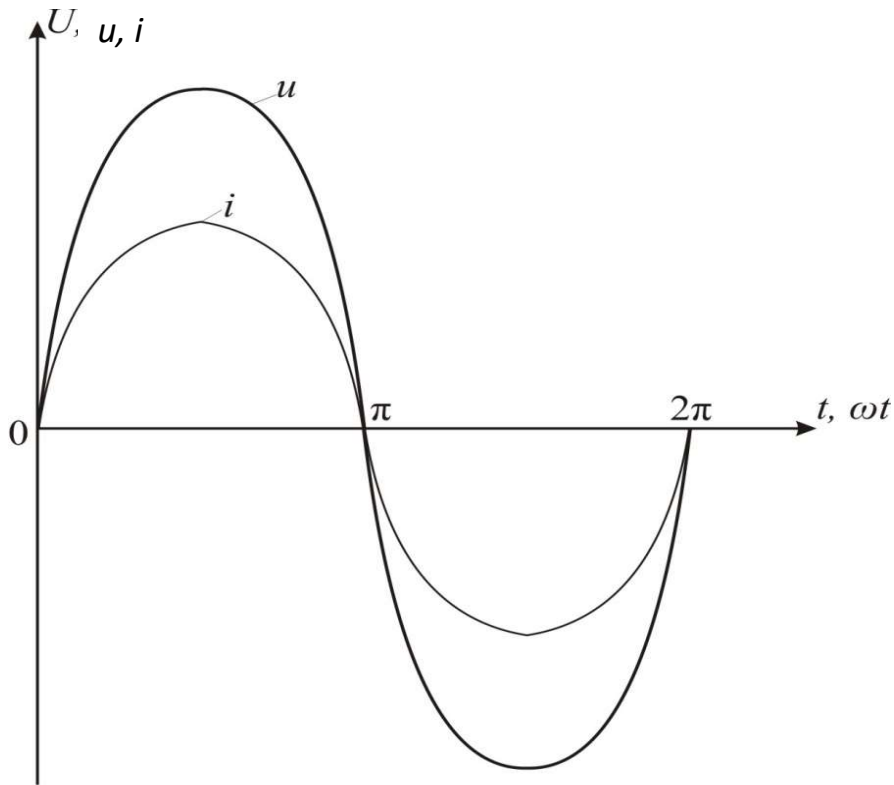


Рис. 4.4. Графіки синусоїд, зсув фаз між якими дорівнює нулю

Синусоїдні величини, зображені на рис. 4.4 описуються виразами

$$u = U_m \cdot \sin \omega t ; i = I_m \cdot \sin \omega t .$$

Синусоїдні напруга і струм, графіки яких представлені на рис. 4.3, описуються так:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) ; i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) . \quad (4.8)$$

Причому, кут зсуву фаз між струмом і напругою (див. рис. 4.3) в такому разі:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i . \quad (4.9)$$

Рівняння (4.8) можна записати інакше :

$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i + \varphi)$, $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$, оскільки $\psi_u = \psi_i + \varphi$ і $\psi_i = \psi_u - \varphi$.

Із цих виразів випливає, що напруга випереджає за фазою струм на кут φ (або струм відстає за фазою від напруги на кут φ).

Сукупність векторів, що зображають синусоїдні ЕРС, напруги і струми однієї частоти, називається векторними діаграмами (рис. 4.5).

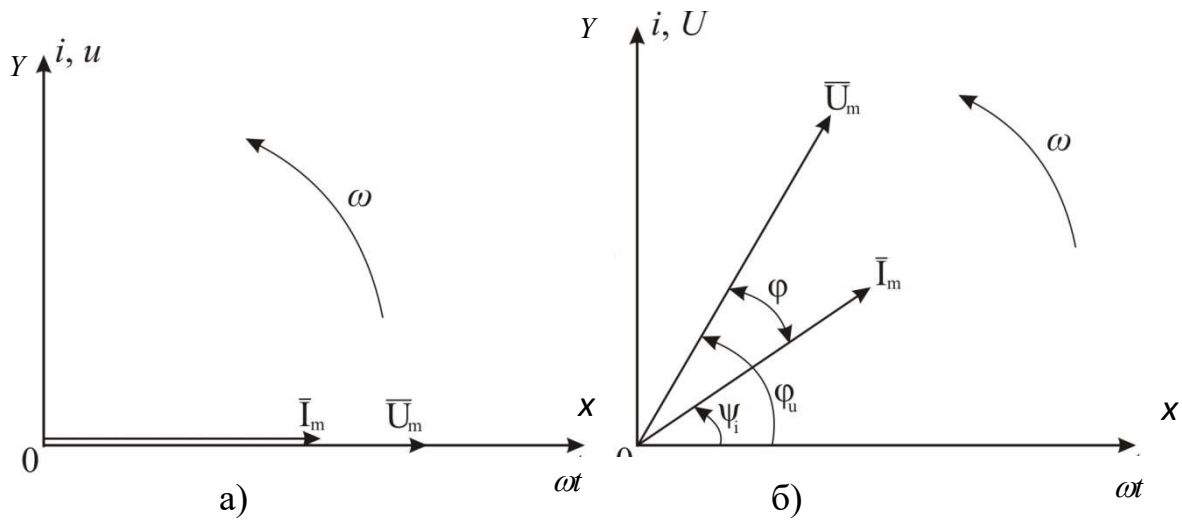


Рис. 4.5. Вектори напруги і струму:
а) з нульовою початковою фазою;
б) з початковими фазами ψ_u ψ_i .

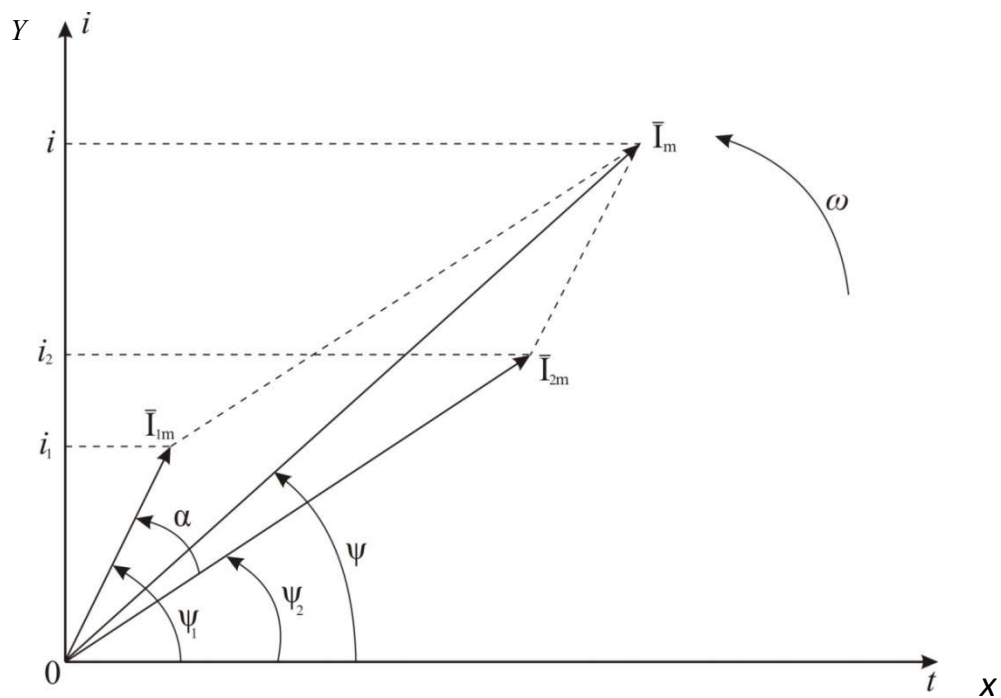


Рис. 4.6. Вектори струмів з початковими фазами ψ_1 і ψ_2 ω

Побудову векторних діаграм найбільш раціонально починати з моменту, коли початкове положення вектора визначається початковою фазою. При початковій фазі $\psi = 0$ вектор у початковий момент

розташовується по осі абсцис. На рис. 4.5, а) показані вектори напруги u і струму i , що зображені синусоїдами на рис. 4.4. У цьому випадку при $t = 0$ їх миттєві значення дорівнюють нулю. На рис. 4.5, б) зображені вектори, що відповідають синусоїдам напруги u і струму i , приведених на рис. 4.3, для яких початкові фази різні, але не рівні нулю. Для цих величин при $t = 0$, їх миттєві значення не дорівнюють нулю.

Використання векторних діаграм робить аналіз електричного кола наочним. У цьому методі складання і віднімання миттєвих значень величин, можна замінити додаванням і відніманням векторів. Так, якщо необхідно скласти два синусоїдних струми однакової частоти: ($i_1 = I_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_1)$ і $i_2 = I_{2m} \cdot \sin(\omega t + \psi_2)$), необхідно в системі прямокутних координат побудувати два вектори, довжина яких, у вибраному масштабі, дорівнює, відповідно амплітудам струмів I_{1m} і I_{2m} , а напрямок визначається початковими фазами ψ_1 і ψ_2 (рис. 4.6.). Якщо ці вектори обертає з однаковою кутовою швидкістю, то їхнє взаємне розташування не зміниться і кут зсуву фаз між ними – α , залишиться незмінним, і буде дорівнювати $\alpha = \psi_1 - \psi_2$. Через це, для будь-якого моменту часу, миттєве значення сумарного струму i дорівнює сумі миттєвих значень струмів i_1 і i_2 , тобто сума проєкцій векторів I_{1m} і I_{2m} на вісь ординат $i = i_1 + i_2$.

Оскільки відомо, що сума проєкцій декількох векторів на одну і ту ж вісь дорівнює проєкції їх геометричної суми на ту саму вісь, то вектор I_m буде представляти собою геометричну суму векторів I_{1m} і I_{2m} , тобто відповідати сумарному синусоїдальному струму – $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$; його довжина у вибраному масштабі, дорівнює амплітуді його струму, а кут ψ – зображає його початкову фазу.

Приклад 4.1. Для синусоїдних напруги і струму записати вирази для їх миттєвих значень (рис. до задачі 4.1). визначити період T і час t_0 , що відповідає початковій фазі струму ψ_i , а також миттєві значення напруг U_1 і U_2 для моментів часу $t_1 = 0,0167c$ і $t_2 = 0,005c$, записати вирази для миттєвих значень напруги U , що відповідають моментам часу t_1 і t_2 , якщо частота мережі $f = 50$ Гц.

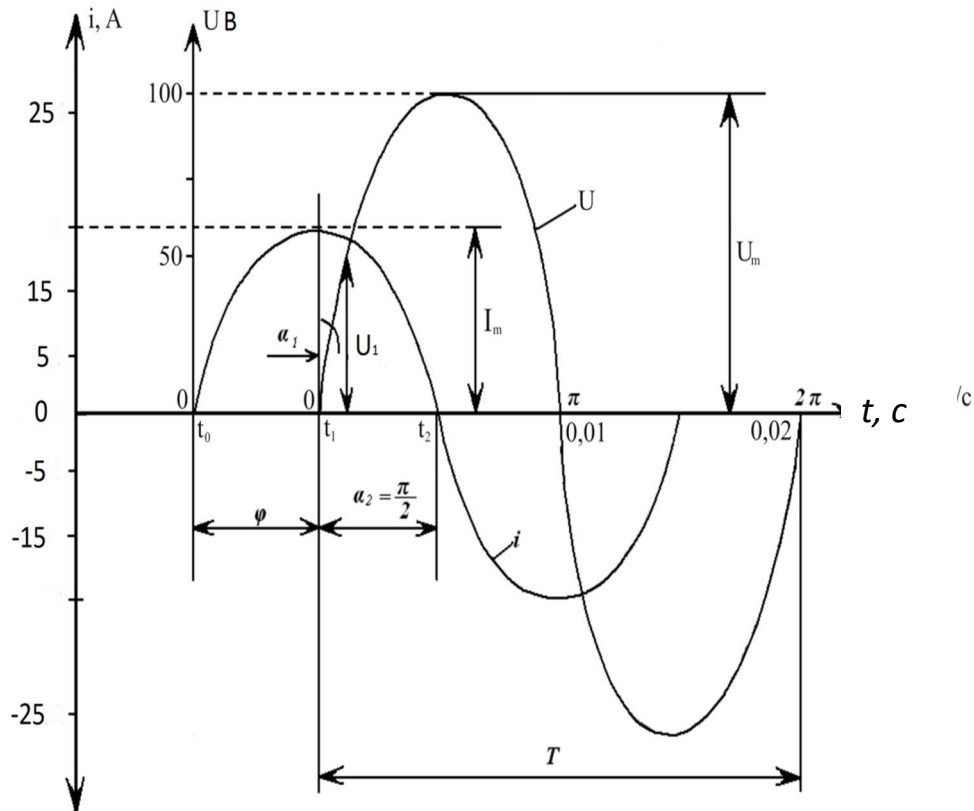


Рисунок до задачі 4.1.

Розв'язання:

1. Миттєві значення напруги і струму мають вигляд:

$$u = U_m \cdot \sin \omega t = 100 \cdot \sin 314t, B;$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = 15 \cdot \sin(314t + \frac{\pi}{2}), A,$$

де U_m, I_m – амплітуда значень напруги і струму.

2. Початкова фаза струму (в радіанах):

$$\psi_i = \frac{90^\circ \cdot 2\pi}{360^\circ} = \frac{\pi}{2}.$$

3. Період змінної напруги і струму:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02c.$$

4. Час початку відліку, тобто часу, що відповідає початковій фазі струму:

$$t_0 = \frac{\psi_i}{\omega} = \frac{\pi/2}{2\pi/T} = \frac{\pi T}{2 \cdot 2\pi} = \frac{T}{4} = 0,005c.$$

5. В моменти часу:

$$t_1 : \alpha_1 = \omega t_1 = \pi/6 = 30^\circ;$$

$$U_1 = 100 \cdot \sin \omega t_1 = 100 \cdot \sin 30^\circ = 50 \text{ В};$$

$$t_2 : \alpha_2 = \omega t_2 = \pi/2 = 90^\circ;$$

$$U_2 = 100 \cdot \sin \omega t_2 = 100 \cdot \sin 90^\circ = 100 \text{ В}.$$

6. Миттєві значення напруг за значенням часу t_1 і t_2 :

- для моменту часу t_1 : $U = U_m \cdot \sin(\omega t_1 + \pi/6)$;
- для моменту часу t_2 : $U = U_m \cdot \sin(\omega t_2 + \pi/2)$.

Приклад 4.2. В однорідному магнітному полі (рис. до задачі 4.2) рівномірно обертається, навколо вісі 00, замкнена накоротко рамка, в якій індукується періодична ЕРС з максимальним значенням $E_m = 10 \text{ В}$. Визначити лінійну швидкість V – переміщення рамки, швидкість обертання n , частоту ЕРС f і її миттєве значення e в момент часу $t = 0,00166 \text{ с}$, якщо розміри сторін рамки $ac = bd = 0,16 \text{ м}$, $ab = cd = l = 0,2 \text{ м}$. Магнітна індукція поля $B = 1 \text{ Вб} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ Тл}$ – (Тесла).

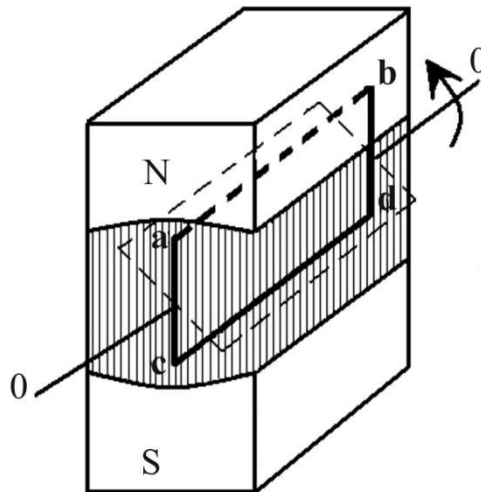


Рис. до задачі 4.2.

Розв'язання:

1. Лінійна швидкість переміщення рамки, згідно з формулою (4.3.):

$$v = \frac{E_m}{B \cdot l} = \frac{10}{1 \cdot 2 \cdot 0,2} = 25 \text{ м / с}.$$

2. Швидкість обертання рамки :

$$n = \frac{60v}{\pi d} = \frac{60v}{\pi \cdot ac} = \frac{60 \cdot 25}{3,14 \cdot 0,16} = 3000 \text{ об/хв}.$$

3. Частота індукованої ЕРС:

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{Гц}.$$

4. Миттєве значення ЕРС в момент часу $t=0,00166$ с:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t = 10 \sin 2\pi \cdot ft = 10 \sin 100\pi \cdot 0,00166 = 10 \sin \frac{1}{6}\pi = 10 \sin 30^\circ = 5 \text{В}$$

4.2.2. Діюче та середнє значення синусоїдальних струму, ЕРС і напруги

Змінний струм цілком визначений, якщо відомо його рівняння або графік (тобто задані максимальне значення, початкова фаза і частота). Проте в повсякденній практиці користуватися рівняннями або графіками струмів важко і не дуже зручно.

Змінний струм зазвичай характеризується його діючим значенням. Діючі значення синусоїдального струму, ЕРС і напруги, позначаються великими літерами I, E, U.

Для визначення діючого значення змінного струму необхідно виходити з якої-небудь його дії в електричному колі (наприклад: теплової).

На рис. 4.7. зображені графіки двох струмів: постійного $I_{\text{д}}$ (пунктирна пряма) і змінного з амплітудою I_m , причому значення постійного струму дорівнює амплітуді змінного I_m .

Якщо порівняти теплову дію цих струмів, неважко прийти до висновку, що постійний струм, який дорівнює амплітуді змінного, виділить більше тепла в одному і тому ж опорі за один і той же час, тому що змінний струм протягом півперіоду залишиться меншим і тільки одну мить ці струми будуть рівні.

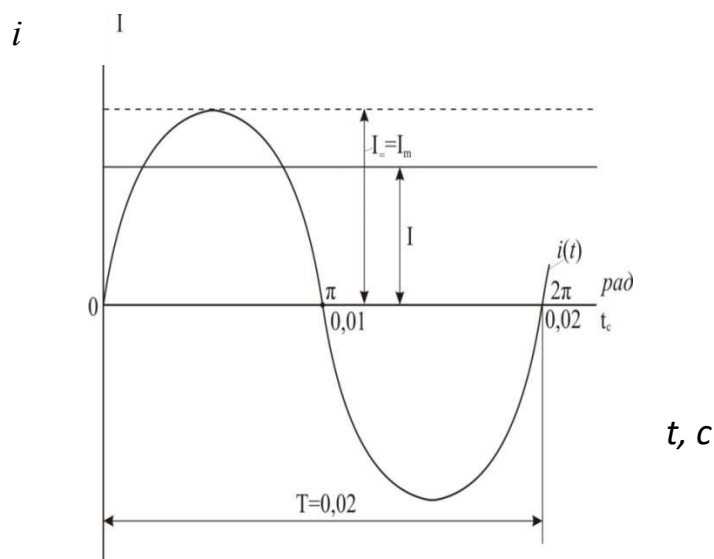


Рис. 4.7. До визначення діючого значення змінного струму

Отже, щоб оцінити діюче значення змінного синусоїдного струму, його теплову дію необхідно порівняти з тепловою дією постійного струму за один і той же проміжок часу. Теплова дія синусоїдного струму буде еквівалентна тепловій дії постійного струму, якщо він, протікаючи через той самий опір R , за проміжок часу, що дорівнює періоду змінного струму T , виділить таку ж саму кількість тепла, що й постійний струм.

Наприклад, якщо величина постійного струму $I_{пост.} = 10\text{ А}$, протікаючи через опір $R = 10\text{ Ом}$, за час, рівний періоду змінного струму $0,02\text{ с}$ виділить кількість тепла $Q = I^2 \cdot RT = 10^2 \cdot 10 \cdot 0,02 = 20\text{ Дж}$, то синусоїдний струм, еквівалентний даному постійному, виділить в опорі $R = 10\text{ Ом}$, та час $t = 0,02\text{ с}$ таку ж кількість тепла $Q = 20\text{ Дж}$. Силу синусоїдального струму I , еквівалентного постійному струмові $I_{пост.} = 10\text{ А}$, необхідно прийняти рівною $I_{зм.} = 10\text{ А}$. Це значення синусоїдного струму, називається діючим.

Діюче значення змінного струму чисельно дорівнює такому значенню постійного струму, яке за однаковий час в одному і тому ж опорі виділяє таку ж саму кількість тепла, як і даний змінний струм.

Визначимо кількість тепла, що виділяється за період T постійним струмом I та змінним струмом $i = I_m \cdot \sin \omega t$ (рис. 4.7) в опорі R :

$$Q_{=} = I^2 \cdot RT ;$$

$$Q_{\square} = \int_0^T i^2 \cdot R dt = \int_0^T I_m^2 R \sin^2 \omega t dt = I_m^2 R \int_0^T \sin^2 \omega t dt .$$

Прирівнявши $Q_{=} = Q_{\square}$, знайдемо діюче значення струму:

$$I^2 T = \int_0^T i^2 dt ;$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} . \quad (4.10)$$

Діюче значення періодичного синусоїдного струму є його середнім квадратичним значенням за період. Його можна знайти із рівняння (4.10), виконавши відповідні перетворення.

Із курсу тригонометрії відомо, що

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} . \quad (4.11)$$

Через це:

$$\int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t dt = \frac{I_m^2}{2} \left(\int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t dt \right) = \frac{I_m^2 T}{2} ,$$

$$\text{оскільки інтеграл } \int_0^T \cos 2\omega t dt = \frac{\sin 2\omega t}{2} \Big|_0^T = \frac{\sin 2\omega T - \sin 0^0}{2} = 0$$

отже,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{I_m^2 T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Таким чином, діюче значення синусоїдального струму менше його максимального (амплітудного) значення в $\sqrt{2}$ разів.

Діюче значення можна розповсюдити на всі синусоїдальні функції ЕРС і напругу:

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m; \\ E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m; \\ U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Амперметри і вольтметри, ввімкнені в коло синусоїдального струму, показують діюче значення відповідних величин.

Оскільки діючі значення синусоїдальних струмів, ЕРС і напруг, знаходяться у постійному співвідношенні з максимальними значеннями цих величин, то вектор, який виражає в одному масштабі максимальне значення, в іншому масштабі – діюче значення тієї самої величини. Далі при побудові векторних діаграм будемо користуватись діючими значеннями синусоїдальних величин.

Діючі значення електричних величин додавати не можна!
Додавати слід їх вектори.

В техніці змінних струмів користуються також поняттям середнього значення струму (напруги, ЕРС). Під середнім значенням періодичної функції в загальному випадку розуміють їх середньоарифметичне значення за період.

Проте середнє значення синусоїдної функції за період дорівнює нулю. Через це за середнє значення синусоїдного струму, напруги і ЕРС прийнято приймати їх середньоарифметичне значення за позитивний напівперіод. Якщо струм $i = I_m \sin \omega t$, тоді середнє значення струму:

$$\begin{aligned} I_{\text{сеп}} &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t dt = \\ &= \frac{I_m}{\pi} \Big| \cos \omega t \Big|_{\pi}^0 = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m. \end{aligned}$$

Аналогічно визначаються середнє значення напруги і ЕРС:

$$U_{\text{сер}} = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m;$$

$$E_{\text{сер}} = \frac{2}{\pi} E_m = 0,637 E_m .$$

Для оцінки періодичних величин вводять коефіцієнтні форми періодичних кривих K_ϕ і амплітуди K_a .

Відношення амплітудного значення струму (напруги, ЕРС) до середнього значення називається коефіцієнтом періодичної форми кривої:

$$K_\phi = \frac{I}{I_{\text{сер}}};$$

Відношення амплітудного значення струму (напруги, ЕРС) до діючого значення називається коефіцієнтом амплітуди:

$$K_a = \frac{I_m}{I} .$$

Для синусідного струму:

$$K_\phi = \frac{I}{I_{\text{сер}}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} * \frac{\pi}{2 I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 .$$

Звідки

$$I_m = 1,11 I_{\text{сер}} .$$

Відповідно для напруги і ЕРС:

$$U = 1,11 U_{\text{сер}} ; \quad E = 1,11 E_{\text{сер}} .$$

Одержане співвідношення дозволяє легко визначити по відомому середньому значенню синусоїдної змінюючої величини її діюче значення, і навпаки.

Коефіцієнт амплітуди:

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} \approx 1,41 .$$

4.2.3. Активний (R), індуктивний (L) і ємнісний (C) елементи у колі синусоїдального струму

4.2.3.1. Коло синусоїдального струму з активним (резистивним) елементом R

Всі реальні електротехнічні пристрої володіють електричним опором R, індуктивністю L і ємністю C, які є параметрами електричного кола змінного струму. Проте, вплив кожного із параметрів на струм в колі – різний. І через це в деяких випадках із розрахункової схеми виключаються ті з них, вплив яких незначний.

Електричні лампи розжарювання, електричні печі опору, побутові нагрівальні прилади, реостати, короткі проводи та інші струмоприймачі, в яких електрична енергія перетворюється в теплову, на схемах заміщення електричних кіл зазвичай зображаються тільки опором R , який називається активним опором.

Для схеми, приведеної на рис. 4.8, а – заданий опір R і напруга, що змінюється за законом:

$$U = U_m \sin \omega t .$$

Потрібно визначити струм і потужність кола:

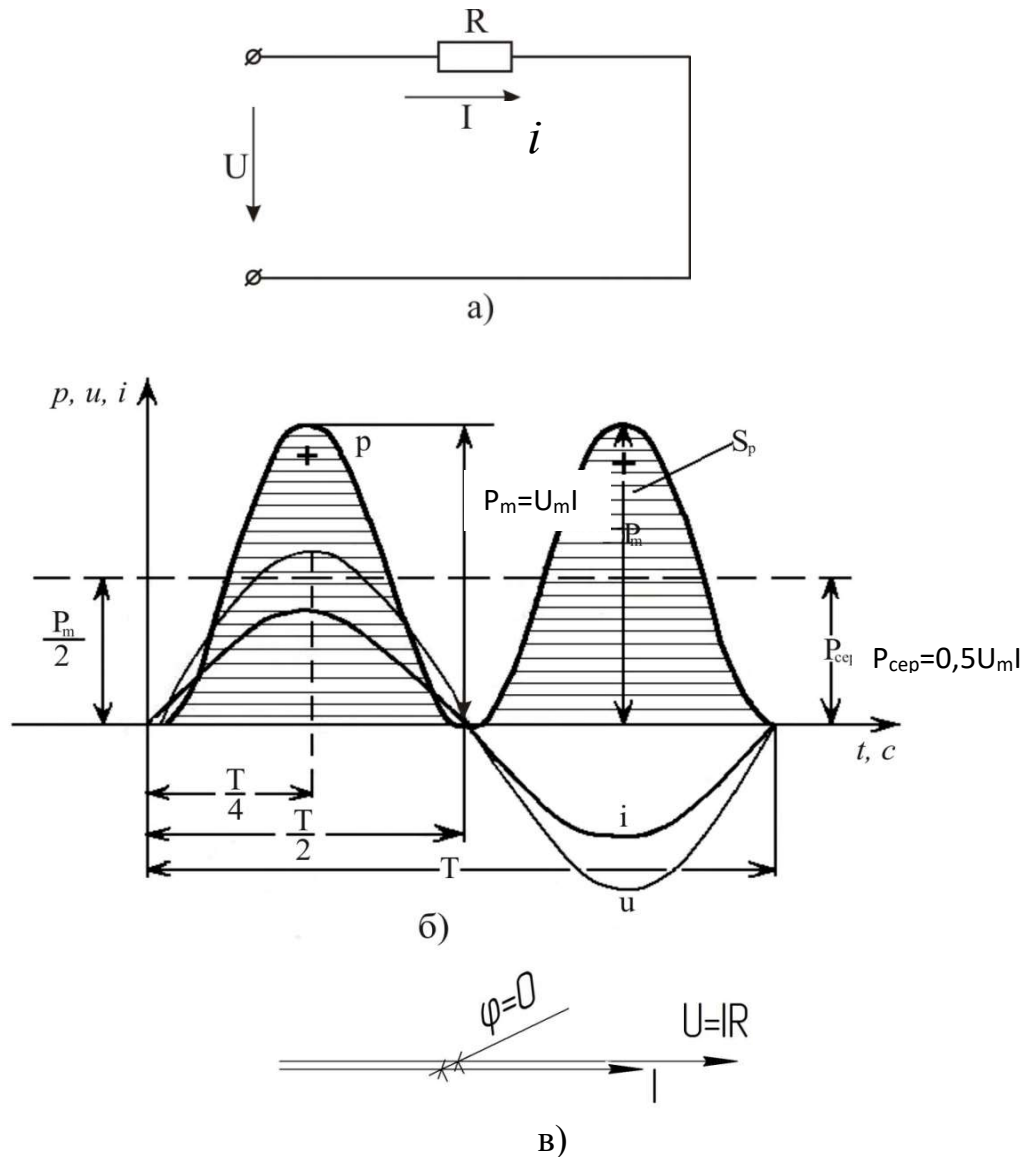


Рис. 4.8. Коло з активним опором:

- а) схема кола; б) графіки струму, напруги і потужності;
в) векторна діаграма діючих значень напруги і струму

Струм у колі

Вираз для миттєвих значень струму знайдемо за законом Ома:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

де $I_m = \frac{U_m}{R}$ – найбільше значення струму.

Із рівнянь напруги і струму видно, що початкові фази обох кривих однакові, тобто, напруга і струм в колі з опором R співпадають по фазі. Це наочно показано за допомогою графіків і векторної діаграми (рис. 4.8, б і в).

Діюче значення струму знайдемо діленням його амплітуди на $\sqrt{2}$:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}R};$$

звідки:

$$I = \frac{U}{R}; U = IR; R = \frac{U}{I}. \quad (4.13)$$

Формули (4.13) виражають закон Ома для кола змінного струму з опором R. Зовні вони нічим не відрізняються від аналогічних формул постійного струму, проте, необхідно пам'ятати, що у формули для кола змінного струму входять діючі значення напруги і струму. Опір провідника змінному струму більше за опір цього провідника постійного струму. Це пояснюється тим, що густина змінного струму через поверхневий ефект, нерівномірна по перерізу провідника. В результаті поверхневого ефекту відбувається витискання струму до поверхні і опір провідника збільшується, і, відповідно, зростають втрати енергії на нагрівання провідника.

Миттєве і середнє значення активної потужності

За змінних значень напруги і струму, швидкість перетворення електричної енергії в приймачі, тобто, його потужність теж змінюється. Миттєве значення потужності дорівнює добутку миттєвих значень напруги і струму.

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Враховуючи вираз (4.11), отримаємо:

$$p = \frac{U_m I_m}{2} - \frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t. \quad (4.14)$$

Більш наочне уявлення про характер зміни потужності в колі дає графік у прямокутній системі координат, який будується після помноження ординат кривих напруги і струму, відповідно ряду значень їх загального аргументу – часу t . Залежність миттєвої потужності від часу – періодична крива (рис. 4.8, б).

Якщо вісь часу t підняти (рис.4.8) на величину $p = \frac{P_m}{2} = \frac{U_m I_m}{2}$, то, відповідно до цієї вісі, графік потужності є синусоїдою з подвійною частотою і початковою фазою -90° :

$$p' = \frac{U_m I_m}{2} \sin(2\omega t - 90^\circ) = -\frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t.$$

Таким чином, в початковій системі координат миттєве значення потужності дорівнює сумі постійної величини $p = \frac{U_m I_m}{2}$ і змінної p' .

Аналізуючи графік миттєвої потужності, неважко помітити, що потужність за час періоду залишається додатною, хоча струм і напруга змінюють свій знак. Це виходить завдяки співпадінню за фазою напруги і струму.

Незмінність знаку потужності каже про те, що напрямок потоку електричної енергії залишається за час періоду незмінним, в даному випадку із мережі (від джерела живлення) до струмоприймача з опором R , де електрична енергія безповоротно перетворюється в інший вид енергії. Електрична енергія в даному випадку називається активною.

Якщо R – опір провідника, то у відповідності з законом Джоуля–Ленца, електрична енергія в ньому перетворюється на тепло.

Швидкість перетворення електричної енергії в інший вид енергії, за кінцевий проміжок часу, значно більший, ніж період зміни струму, характеризується середньою потужністю. Для проміжку часу, значно більшого періоду T , ця потужність дорівнює середній потужності за період, яка зветься активною потужністю P . Для кола, що розглядається, неважко визначити активну потужність із графіка (рис. 4.8, б).

Середнє значення потужності дорівнює висоті прямокутника з основою T , рівнозначного площині, обмеженій кривою $p(t)$ і віссю абсцис (на рисунку – заштрихована).

Рівнозначність площин $P_c T = S_p$ виконується, якщо висоту прямокутника взяти рівною половині найбільшого значення миттєвої потужності P_m .

В такому разі частина площини S_p , що розташована вище прямокутника, точно уміщується в частину, що залишилася не заштрихована:

$$P = \frac{P_m}{2} = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = UI.$$

Потужність кола з опором R називається активною і дорівнює добутку діючих значень напруги і струму (аналогічно колом постійного струму):

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (4.15)$$

Одиницею вимірювання активної потужності є ват (Вт). Активна потужність характеризує середню швидкість перетворення електричної енергії у теплову, механічну, хімічну та інші.

Приклад 4.3. Записати вираз для миттєвого значення струму у колі з резистором, що має опір 100 Ом , який підключений до джерела змінної напруги 42 В , з частотою 50 Гц , якщо початкова фаза $\psi_i = -45^\circ$.

Розв'язання :

1. Діюче значення струму, за законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{42}{100} = 0,42 \text{ А}.$$

2. Миттєве значення:

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \psi_i) = \sqrt{2} \cdot 0,42 \sin(314t - 45^\circ) = 0,59 \sin(314t - 45^\circ)$$

Приклад 4.4. Миттєві значення струму і напруги в колі з резистором відповідають виразам: $i = 14,1 \cdot \sin(314t + \pi/3), \text{ А}$ і $u = 59,2 \cdot \sin(314t + \pi/3), \text{ В}$.

Визначити опір резистора, знайти діючі значення струму і напруги.

Розв'язання:

1. Діючі значення струму і напруги, відповідно:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{14,1}{\sqrt{2}} = 10 \text{ А};$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{59,2}{\sqrt{2}} = 42 \text{ В}.$$

2. Опір резистора, R :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{42}{10} = 4,2 \text{ Ом}.$$

Приклад 4.5. Вираз для миттєвого значення струму у колі з резистором, що має опір 10 Ом , записується у вигляді $i = 15,5 \cdot \sin(314t - 30^\circ), \text{ А}$. Побудувати графіки залежностей миттєвих значень струму і напруги резистора в часі, знайти їх діюче значення.

Розв'язання:

1. Діюче значення струму:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{15,5}{\sqrt{2}} = 11A$$

2. Знаючи величину опору, знаходимо діюче значення напруги:

$$U = IR = 11 \cdot 10 = 110B.$$

3. Максимальне (амплітудне) значення напруги:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 110 = 155B.$$

4. Миттєве значення напруги у колі з резистором збігається в часі з миттєвим значенням струму і запишеться у вигляді:

$$U = U_m \cdot \sin(314t - 30^\circ) = 155 \cdot \sin(314t - 30^\circ), B.$$

5. Будуємо графіки залежностей миттєвих значень напруги і струму:

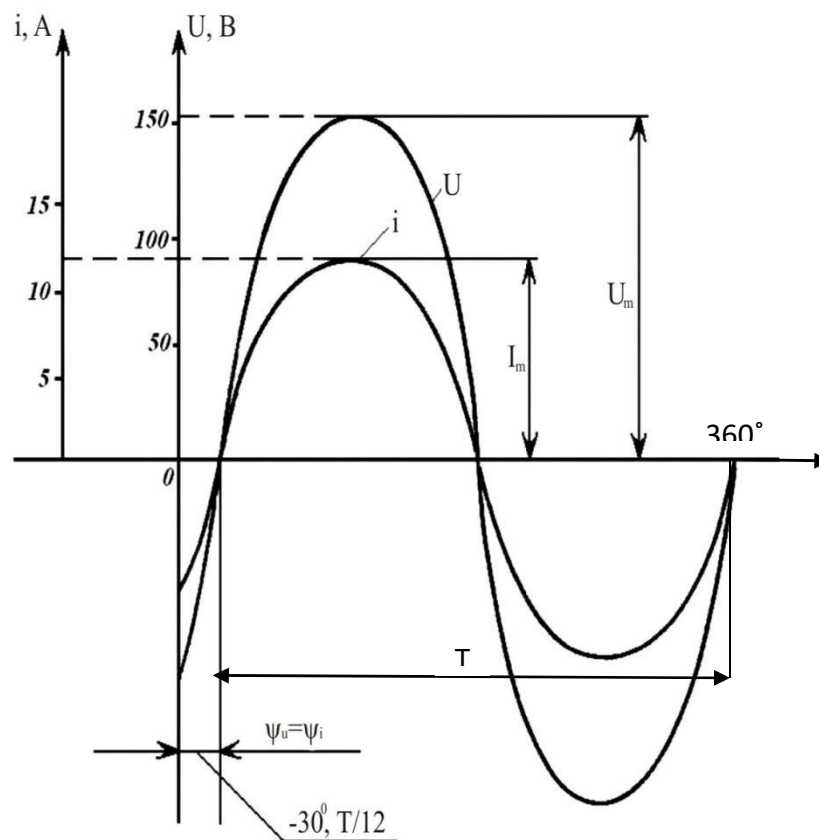


Рис. до задачі 4.5

4.2.3.2. Коло синусоїдного струму з індуктивним елементом L

Обмотки електричних машин, трансформаторів, апаратів захисту і керування, а також обмотки котушок, що використовуються в електротехнічних приладах різноманітного призначення, характеризуються параметром, який називається **індуктивністю (L)**.

Індуктивність – кількісна характеристика зв'язку між магнітним потоком самоіндукції Φ_c , у електричному колі, яке утримує певну

кількість витків w , і силою струму I в ньому $L = w\Phi_c/I$ (див. розділ 3, п.3.2.2).

Будь-яка обмотка поряд з індуктивністю L володіє також певним активним опором $R_{об.}$ – опір дроту обмотки постійному струму.

Розглянемо котушку з індуктивністю L , активним опором якої можна нехтувати ($R_{об.} \approx 0$), тобто розглянемо ідеалізовану котушку без осердя (рис.4.9, а). Нехай через неї проходить синусоїдний струм

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (4.16)$$

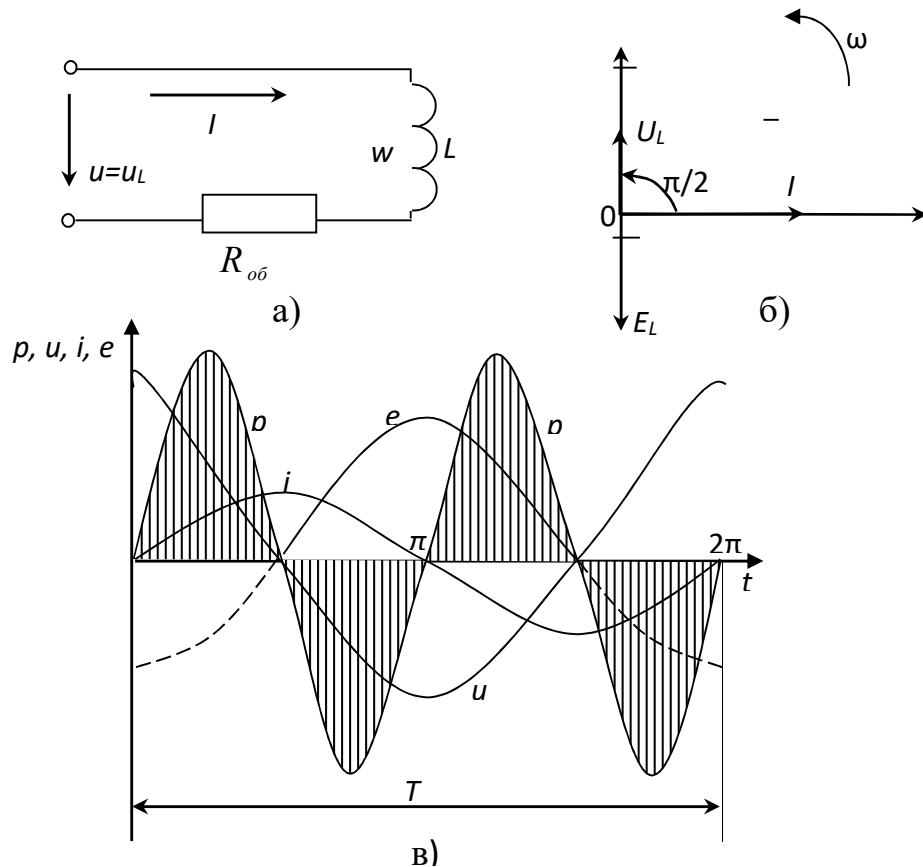


Рис. 4.9. Коло з індуктивністю L :

а) – схема заміщення кола;

б) – векторна діаграма;

в) – графіки струму, напруги, ЕРС самоіндукції і потужності

Цей струм, за законом електромагнітної індукції, визиває в котушці ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin(\omega t + \psi_i))}{dt} = -\omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = E_{im} \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.17)$$

Із формули (4.17) виходить, що ЕРС самоіндукції E_L відстає за фазою від струму на кут $\pi/2$ (Рис.4.9, б). Якщо $\sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) = 1$, то $E_{Lm} = \omega L I_m$, а діюче значення ЕРС самоіндукції

$$E_L = \omega L I. \quad (4.18)$$

Оскільки активний опір кола дорівнює нулю, то вся напруга, прикладена до котушки, йде на перемагання ЕРС самоіндукції. Це означає, що миттєве значення напруги, прикладеної до котушки, і ЕРС самоіндукції в будь-який момент часу рівні за абсолютною величиною і протилежні за знаком:

$$\begin{aligned} U_L = -e_L &= -\omega L I_m \sin\left(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}\right) = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= U_{Lm} \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Зіставивши рівняння (4.16) і (4.19), можна встановити, що напруга на індуктивності змінюється, як і струм, за синусоїдальним законом, і що напруга випереджає струм на кут $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.9, б і в).

Якщо $\sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) = 1$, то $U_{Lm} = I_m \omega L$, звідки

$$I_m = \frac{U_{Lm}}{(\omega L)}. \quad (4.20)$$

Розділивши праву і ліву частини (4.20) на $\sqrt{2}$, одержимо закон Ома для кола з індуктивністю для діючого значення струму.

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}, \quad (4.21)$$

де $X_L = \omega L = 2\pi fL$ називається реактивним опором індуктивності (котушки), або просто індуктивним опором. Цей опір враховує реакцію електричного кола на зміну магнітного потоку в індуктивності.

Розмірність

$$[X_L] = [\omega L] = \frac{1}{c} \text{Ом} \cdot c = \text{Ом}.$$

Видно, що індуктивний опір $X_L = \omega L = 2\pi fL$ пропорційний частоті.

Формула (4.21) схожа на формулу Ома. Ця зовнішня схожість дозволяє визначати струм у колі з індуктивністю подібно тому, як і в колі з активним опором. Але необхідно пам'ятати, що індуктивний опір з фізичної точки зору нічого спільного із звичайним опором не має. Поняття про індуктивний опір формально введено для полегшення розрахунків.

Воно замінює в розрахунках фактичний вплив ЕРС самоіндукції на струм у колі, тобто відображає інерційні властивості електричного кола.

Миттєва потужність, що виділяється в індуктивному елементі,

$$p_L = U_L i = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \\ = \frac{U_{Lm} I_m}{2} \sin(2\omega t + 2\psi_i) = U_L I \sin(2\omega t + 2\psi_i) \quad (4.22)$$

звідки випливає, що миттєва потужність в колі з індуктивністю змінюється, як і струм, за синусоїдальним законом, причому з частотою в два рази більшою за частоту струму (рис. 4.9, в). Із (рис. 4.9, в) також видно, що за першу чверть періоду, коли потужність додатна і струм зростає від 0 до I_m електрична енергія надходить із електричної мережі в індуктивний елемент, де вона витрачається на утворення магнітного поля, причому її затрати максимальні до кінця першої чверті періоду $W_L = LI_m^2 / 2$, тобто коли струм стане максимальним. У другу чверть періоду струм спадає від I_m до нуля, напруга і потужність від'ємні, а енергія магнітного поля, накопичена в індуктивному елементі, повністю виділяється в електричну мережу. В другому півперіоді процес повторюється. Отож, середнє значення потужності (активна потужність) кола з ідеальною котушкою за період дорівнює нулю:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T u i \cdot dt = 0. \quad (4.23)$$

Отже, у колі з індуктивним елементом безперервно відбувається обмін енергією між мережею (джерелом) і магнітним полем індуктивного елемента (катушки). Цей процес протікає без втрат енергії на нагрівання провідників електричного кола, тобто у колі відбувається незгасаючий коливальний процес обміну енергією. Амплітуду коливання потужності у колі з ідеальною котушкою прийнято називати *реактивною індуктивною потужністю*

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L. \quad (4.24)$$

4.2.3.3. Коло синусоїдного струму з індуктивністю L та активним опором R

Ідеальна катушка володіє тільки індуктивним опором, на практиці це може бути коло змінного струму, що живить електромагніт з обмоткою із дроту великого перерізу; активним опором такої обмотки можна нехтувати, оскільки він занадто малий відносно до індуктивного опору.

Реально кожна катушка володіє як реактивним, так і активним опором. Кола з такими опорами найбільш характерні для електроустановок

змінного струму. До них відносяться кола, що живлять електродвигуни, трансформатори, апарати керування тощо.

Котушку можна розглядати як послідовне з'єднання активного опору R та індуктивності L , яка створює індуктивний опір X_L (рис. 4.10, а). Напруга, прикладена до такого кола в кожний момент часу, витрачається на перемагання активного та індуктивного опорів. Частина напруги, яка йде на подолання активного опору, називається *активним спадом напруги*

$$U_a = IR. \quad (4.25)$$

Він збігається за фазою зі струмом.

Частина напруги, що йде на перемагання індуктивного опору, називається *індуктивним спадом напруги*

$$U_L = IX_L. \quad (4.26)$$

вона випереджує струм на кут 90° (Рис. 4.10, б).

Побудуємо векторну діаграму кола. Для цього відкладемо у горизонтальному напрямі вектор струму \bar{I} і у тому ж напрямі вектор активного спаду напруги \bar{U}_a , що збігається з ним. Оскільки індуктивний спад напруги випереджає струм на 90° , то вектор \bar{U}_L відкладемо по вертикалі вгору. Додаючи геометрично вектори \bar{U}_a і \bar{U}_L , одержимо вектор напруги \bar{U} , прикладеної до кола.

Як видно із векторної діаграми (рис. 4.10, в) напруги U , U_a і U_L пов'язані між собою таким співвідношенням, як і сторони прямокутного трикутника напруг, катети якого зображають напруги U_a і U_L , а гіпотенуза – напругу U на затискачах кола.

Отже, можна написати:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (4.27)$$

Підставивши у цей вираз відоме значення напруг $U_a = IR$;

$$U_L = IX_L \text{ одержимо } U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2},$$

звідки

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (4.28)$$

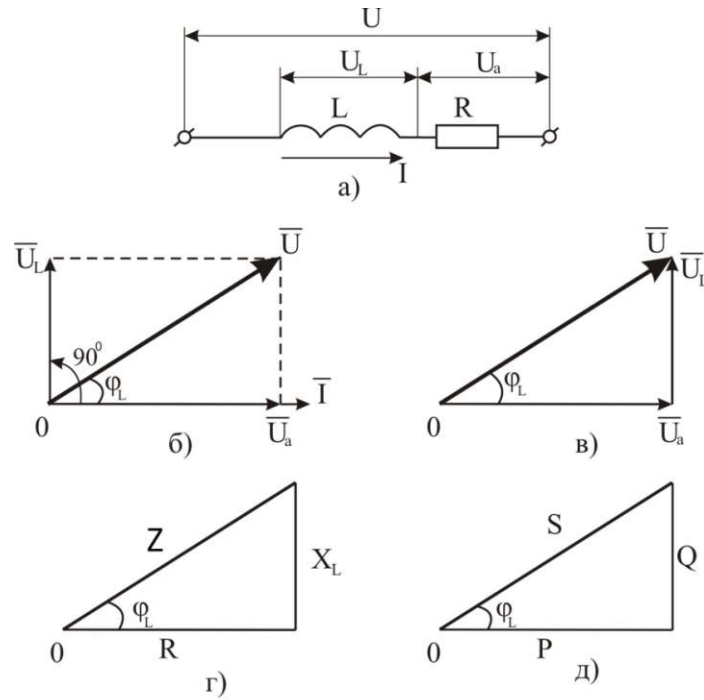


Рис. 4.10. Послідовне з'єднання індуктивності L і активного опору R :
а) схема заміщення кола; б) векторна діаграма напруг;
в) трикутник напруг; г) трикутник опорів;
д) трикутник потужностей

Якщо позначити $\sqrt{R^2 + X_L^2} = z$, то можна виразу (4.28) надати простішого вигляду:

$$I = \frac{U}{z}$$

Величину $z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ називають повним опором кола. Повний опір вимірюється в омах.

Поділивши всі сторони трикутника напруг на силу струму, одержимо трикутник опорів (рис. 4.10, г). З трикутника опорів знаходимо кут зсуву фаз φ між напругою U і струмом I за формулами:

$$\cos \varphi = \frac{R}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}.$$

Якщо всі сторони трикутника напруг помножити на діюче значення струму I , то одержимо трикутник потужностей (рис. 4.10, д). Він геометрично зв'язує між собою активну P , реактивну Q і загальну S потужності.

З трикутника потужностей випливає, що активна потужність P дорівнює добутку активної складової напруги U_a на силу струму I :

$$P = U_a I.$$

Оскільки $U_a = IR$, то формулу активної потужності можна записати так:

$$P = I^2 R.$$

З трикутника потужностей також випливає, що

$$P = UI \cos \varphi \quad (4.29)$$

де P – активна потужність, Вт;

U – напруга на затискачах кола, В;

I – сила струму, А;

$\cos \varphi$ – косинус кута зсуву фаз між струмом і напругою, який називається коефіцієнтом потужності; він показує, яка частина повної потужності перетворюється в активну, тобто яка частина потужності виконує корисну роботу.

Реактивна потужність Q дорівнює добутку індуктивної складової напруги U_L на силу струму I :

$$Q = U_L I \text{ або } Q = I^2 X_L. \quad (4.30)$$

З трикутника потужностей

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (4.31)$$

Реактивна потужність Q вимірюється у вольт-амперах реактивних (вар).

Повна потужність S дорівнює добутку напруги на затискачах кола на силу струму кола:

$$S = UI. \quad (4.32)$$

Повна потужність вимірюється у вольт-амперах (ВА).

З трикутника потужностей знаходимо зв'язок між різними потужностями

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4.33)$$

Під повною уявною потужністю S у колі синусоїдального струму розуміють максимально можливу потужність за заданими напругою U і струмом I .

Очевидно, що максимальна потужність у колі буде при $\cos \varphi = 1$, тобто за відсутністю зсуву фаз між напругою і струмом (формула (4.32)).

Необхідність у введенні цієї потужності пояснюється тим, що при конструюванні і виробництві електротехнічних установок, пристроїв, апаратів, електричних мереж і тощо. їх розраховують на певну (визначену) номінальну напругу $U_{ном.}$ і певний номінальний струм $I_{ном.}$ і їх добуток $U_{ном.} \cdot I_{ном.} = S_{ном.}$ дає максимально можливу потужність даного пристрою. Повна потужність $S_{ном.}$ зазначається у паспорті більшості електроустановок змінного струму.

Приклад 4.6. Визначити реактивний опір котушки, індуктивність якої 10 мГн, при частоті змінного струму 400 Гц. Чому повинна бути рівна індуктивність котушки, щоб при частоті 50 Гц опір був рівний 10 Ом?

Розв'язання.

1. Визначаємо реактивний опір котушки при частоті змінного струму 400 Гц.

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 25 \text{ Ом.}$$

2. За частоти 50 Гц, індуктивність буде

$$X_L = 10 = 2\pi fL; 10 = 314L;$$
$$L = \frac{10}{314} = 0,032 \text{ Гн} = 32 \text{ мГн.}$$

Приклад 4.7. До промислової мережі змінного струму напругою 220 В підключене індуктивне навантаження, активний опір якого 10 Ом. Знайти повний опір навантаження й її індуктивність, якщо діюче значення струму кола 10 А.

Розв'язання.

1. Визначаємо загальний опір навантаження:

$$z = \frac{U}{I} = \frac{220}{10} = 22 \text{ Ом.}$$

2. Індуктивне значення опору визначимо за формулою повного опору кола:

$$z^2 = R^2 + X_L^2,$$
$$22^2 = 10^2 + X_L^2, X_L^2 = 484 - 100; X_L = \sqrt{384} = 19,6 \text{ Ом.}$$

3. Величину індуктивності навантаження розрахуємо за формулою

$$X_L = 2\pi fL; 19,6 = 314L,$$
$$L = \frac{19,6}{314} = 0,0624 \text{ Гн} = 62,4 \text{ мГн.}$$

Приклад 4.8. До промислової мережі змінної напруги 220 В приєднана котушка з активним опором $R = 6$ Ом та індуктивністю $L = 50$ мГн.

Побудувати трикутник опорів котушки і векторну діаграму напруг.

Розв'язання.

1. Схема заміщення котушки буде мати вигляд аналогічний рисунку 4.10, а.

2. Визначаємо індуктивний опір котушки

$$X_L = 2\pi fL = 314 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 15,7 \text{ Ом.}$$

3. Загальний опір кола,

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{6^2 + 15,7^2} = 16,8 \text{ Ом.}$$

4. Струм у колі

$$I = \frac{U}{z} = \frac{220}{16,8} = 13 \text{ А.}$$

5. Спади напруг на окремих елементах

$$U_R = IR = 13 \cdot 6 = 78,6 \text{ В.}$$

$$U_L = IX_L = 13 \cdot 15,7 = 204 \text{ В.}$$

6. Будуємо трикутник опорів і векторну діаграму напруг.

Масштаб опорів

$$m_R = 3 \text{ Ом/см}$$

довжини відрізків:

$$l_R = \frac{6}{3} = 2 \text{ см}$$

$$l_{X_L} = \frac{15,7}{3} = 5,2 \text{ см}$$

$$l_z = 5,6 \text{ см} \cdot m_R = 5,6 \cdot 3 = 16,8$$

Ом

Масштаб напруг

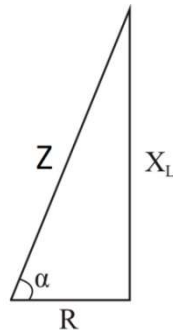
$$m_U = 40 \text{ В/см}$$

довжини векторів:

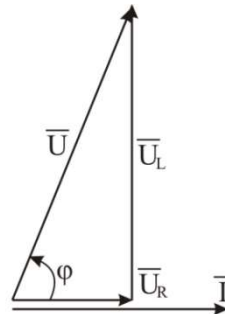
$$l_{U_R} = \frac{78,6}{40} = 1,96 \approx 2 \text{ см}$$

$$l_{U_L} = \frac{204}{40} = 5,1 \text{ см}$$

$$l_U = 5,5 \text{ см} \cdot m_U = 5,5 \cdot 40 = 220 \text{ В}$$



Трикутник опорів



Векторна діаграма напруг

4.2.3.4. Котушка індуктивності з феромагнітним магнітопроводом у колі з синусоїдною напругою

Розглянемо ідеалізовану котушку з феромагнітним магнітопроводом (рис.4.11), яка отримує живлення синусоїдною напругою, яку для спрощення подальших розрахунків вибираємо з початковою фазою $\psi_U = 90^\circ$, тобто

$$U = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \cos \omega t ,$$

(під ідеалізованою котушкою розуміється котушка, активний опір обмотки якої занадто малий і ним можна нехтувати, магнітний потік розсіювання відсутній).

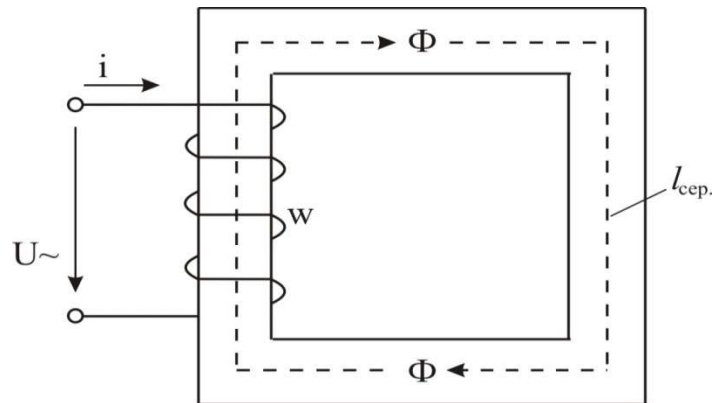


Рис. 4.11. Ідеалізована котушка з феромагнітним магнітопроводом

Напруга, що живить котушку врівноважується тільки ЕРС самоіндукції, (див. також рівняння: (3.14), (3.15) і (3.16)), через це

$$U = -e_L = \frac{d\psi}{dt} = w \frac{d\Phi}{dt},$$

де w – число витків котушки.

Щоб знайти магнітний потік, запишемо

$$d\Phi = \frac{1}{w} U_m \cos \omega t dt.$$

Після інтегрування одержимо

$$\Phi = \frac{U_m}{w\omega} \sin \omega t + C,$$

де C – постійна інтегрування, що відповідає постійній складовій магнітного потоку.

Досвід показує, що постійна складова магнітного потоку в котушці відсутня, через це

$$\Phi = \frac{U_m}{w\omega} \sin \omega t = \Phi_m \cos(\omega t - 90^\circ). \quad (4.34)$$

Із останнього рівняння випливає, що при синусоїдній напрузі магнітний потік синусоїдний і відстає за фазою від прикладеної напруги на кут 90° ; амплітуда магнітного потоку

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w\omega} = \frac{U_m}{2\pi f w},$$

звідси при переході до діючого значення напруга $U = \frac{2\pi f w}{\sqrt{2}} \Phi_m$.

Враховуючи, що ЕРС самоіндукції $E_L = U$, одержимо важливу формулу для практичних розрахунків кіл, що утримують котушки індуктивності з феромагнітним магнітопроводом при синусоїдальній напрузі живлення:

$$U = E_L = 4,44 f w \Phi_m, B. \quad (4.35)$$

За умов, характерних для експлуатації, $U = const$, $f = const$ амплітуда магнітного потоку в магнітоводі ідеалізованої котушки не залежить від його магнітного опору, тобто довжини, площини поперечного перерізу і матеріалу – в цьому принципова різниця магнітних кіл зі змінною МРС від магнітних кіл з постійною МРС.

4.2.3.5. Коло синусоїдного струму з ємнісним елементом С

Ємнісний елемент електричного кола являє собою ідеальний конденсатор. Із курсу фізики відомо, що найпростішим конденсатором являється пристрій, що складається із двох металевих пластин, розділених тонким прошарком якої-небудь ізоляційної речовини чи ізоляційного матеріалу. Металеві пластини, що входять до складу конденсатора, називають його обкладинками.

Якщо обкладинки конденсатора приєднати до джерела постійної напруги: одну до затискача + «плюс», другу до затискача – «мінус», то конденсатор отримає певну величину заряду q (тобто він зарядиться). На одній обкладинці скупчиться позитивний заряд, на другій – рівний йому за величиною, але протилежний за знаком. Після закінчення процесу зарядження конденсатор залишається в пасивному (статичному) режимі, струм у колі відсутній. Отже, дві паралельні обкладинки, розділені непровідним середовищем, здатні накопичувати електричні заряди і їх зберігати. При цьому зосереджений на обкладинках заряд прямо пропорційний прикладеній до них напрузі, тобто:

$$q = CU.$$

У цьому рівнянні коефіцієнт пропорційності C характеризує здатність системи обкладинок (електродів) накопичувати електричні заряди і називається **ємністю**.

Ємність конденсатора $C = q/U$ – є відношення його заряду до напруги, при якій він може отримати даний заряд. Для кожного конденсатора його ємність являється постійною величиною. Вона прямо пропорційна площині обкладинок і обернено пропорційна відстані між обкладинками (тобто товщини прошарку ізоляції між ними) і, крім того, залежить від властивості речовини чи матеріалу, із яких виконаний ізоляційний прошарок (чим вищі їх ізоляційні властивості, тим більша ємність конденсатора).

Конденсатори (або ємності) на кресленнях і схемах зображуються у вигляді двох паралельних ліній довжиною 8мм, з відстанню між паралельними лініями 1,5мм.

У міжнародній системі одиниць СІ одиницею вимірювання ємності є **фарад**, який позначається буквою Φ (F).

$$|C| = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт}} = \frac{Kл}{В} = \frac{A \cdot c}{В} = \Phi \text{ (фарад)}.$$

Конденсатор володіє ємністю в 1Φ , якщо при напрузі між обкладинками в $1В$ він отримує заряд, рівний одному кулону.

Одиниці електричної ємності присвоєно найменування „фарад” на знак поваги до англійського фізика Майкла Фарадея на 1-му міжнародному конгресі електриків у 1891 р. в Парижі.

Фарад – це велика одиниця. Встановлено, що ємність в 1Φ може мати куля, радіус якої дорівнює $9 \cdot 10^{11} \text{ см}$, або 9 млн. км. Наша планета Земля має ємність лише близько шести десятитисячних ($6 \cdot 10^{-4}$) Φ .

Тому для вимірювання електричної ємності користуються значно меншими одиницями – мікрофарадами ($m\Phi$, μF) і піко фарадами ($n\Phi$, pF):

$$1m\Phi = 10^{-6} \Phi; 1n\Phi = 10^{-12} \Phi.$$

Окрім того існують позасистемні одиниці:

$$1\Phi = \frac{1A \cdot c}{1В} = 1 \frac{c}{Om}; 1\Phi = 9,648 \cdot 10^4 Kл.$$

Конденсатори володіють чудовими властивостями: вони пропускають змінний електричний струм (і тим краще, чим більша його частота) і затримують постійний. Ось чому конденсатори часто встановлюють на «перехрестях» електричних шляхів, там де потрібно відокремити змінний струм від постійного.

Отже, якщо конденсатор вмикається в мережу синусоїдного струму, то в ній починається безперервно протікати певний, усталений струм.

Пояснюється це явище тим, що в колі синусоїдального струму відбувається безперервне перезарядження конденсатора: кожна його обкладинка два рази упродовж періоду змінює знак свого заряду (з плюса на мінус і назад). У результаті в колі між кожною із обкладинок конденсатора і джерелом струму відбувається безперервний рух електричних зарядів – протікає електричний струм.

Якщо до затискачів електричного кола, яке утримує ємнісний елемент (рис. 4.12, а) прикладена синусоїдальна напруга

$$U_c = U_{cm} \sin(\omega t + \psi_U) \quad (4.36)$$

струм у такому колі є рух зарядів між обкладинками конденсатора

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (4.37)$$

але оскільки $q = CU_c$, то $dq = CdU_c$, і отже струм,

$$i = \frac{CdU_c}{dt} \quad (4.38)$$

якщо напруга $U_c = U_{cm} \sin(\omega t + \psi_U)$, то струм у колі буде,

$$i = C \frac{d[U_{cm} \sin(\omega t + \psi_U)]}{dt} = \omega CU_{cm} \cos(\omega t + \psi_U) = I_m \sin(\omega t + \psi_U + \pi/2), \quad (4.39)$$

де $I_m = \omega CU_m$.

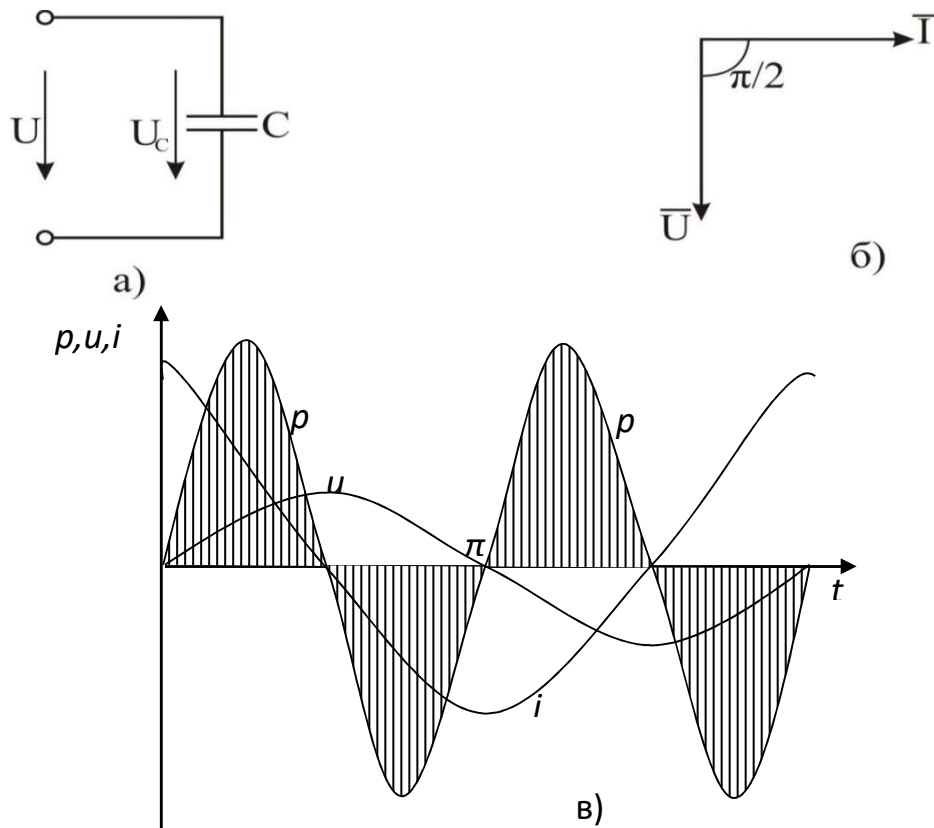


Рис. 4.12. Коло з ємністю:

**а) – схема кола; б) – векторна діаграма;
в) – графіки струму i , напруги u і потужності p**

Таким чином, струм у колі з ідеальним конденсатором, як і напруга на ємності, змінюється за синусоїдальним законом, причому струм випереджає напругу по фазі на кут $\pi/2$. Інакше, напруга відстає від струму по фазі на кут $\pi/2$, що видно із векторної діаграми (рис. 4.12, б) і графіка миттєвих значень (рис. 4.12, в).

Слід пам'ятати, що постійний струм в колі з ідеальним конденсатором існувати не може, тому що протікання струму в такому колі

пов'язані з існуванням електричного струму зміщення, через це конденсатор в колі постійного струму розриває коло.

Амплітуда струму кола з ємнісним елементом за формулою (4.39)

$$I_m = \omega C U_{cm}.$$

Діюче значення струму (закон Ома кола з ємністю) має вигляд:

$$I = \omega C U_c = \frac{U_c}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_c}{X_c}, \quad (4.40)$$

де $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ – реактивний опір ємності, Ом, або простіше

ємнісний опір, який враховує реакцію електричного кола на зміну електричного поля в конденсаторі, причому значення цього опору обернено пропорційно частоті;

ω – кутова частота, рад/с;

C – ємність конденсатора, Ф.

Миттєва потужність p в колі з ємнісним елементом

$$p = U_c i = U_{cm} I_m \sin(\omega t + \psi_U) \sin(\omega t + \psi_U + \pi/2) = \frac{U_{cm} I_m}{2} \sin(2\omega t + \psi_U) = U_c I \sin(2\omega t + \psi_U) \quad (4.41)$$

Із виразу (4.41) випливає, що миттєва потужність змінюється за синусоїдальним законом з подвійною частотою по відношенню до струму (рис. 4.12, в).

Середнє значення потужності за період для кола з ідеальним конденсатором, як видно із графіка (рис. 4.11, в), дорівнює нулю:

$$P_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = 0.$$

Розглянемо, як протікають процеси в колі з ємнісним елементом. Із рис.4.12, в (для випадку, коли початкова фаза напруги дорівнює нулю) видно, що в першу чверть періоду напруга на конденсаторі збільшується, струм позитивний – відбувається зарядка конденсатора, тобто накопичення енергії в електричному полі конденсатора за рахунок електричної енергії мережі, що надходить до конденсатора. Накопичена в конденсаторі за першу чверть періоду енергія електричного поля дорівнює $W_c = C U_{cm}^2 / 2$. Протягом другої чверті періоду напруга на конденсаторі зменшується, струм і потужність негативні – відбувається розрядка конденсатора і енергія електричного поля віддається в мережу. Отже, в колі з ідеальним конденсатором відбувається неперервний періодичний процес обміну енергією між конденсатором і мережею, причому процес відбувається без втрат енергії.

Амплітуду коливання потужності в колі з ємністю називають реактивною ємнісною потужністю:

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C. \quad (4.42)$$

Реактивну ємнісну, як і реактивну індуктивну, потужності виражають в вольт-амперах реактивних (вар) це – позасистемна одиниця реактивної потужності, 1вар = 1ВА.

На рис. 4.12, б побудовані вектори діючих значень напруги і струму на ідеальному конденсаторі, коли $\psi_U = 0$.

У тому випадку, коли послідовно з конденсатором в коло змінного струму ввімкнено активний опір, струм, як і до того, буде випереджувати напругу, але кут зсуву фаз φ буде вже менше 90° .

Таким чином, ознайомившись з явищами у колах змінного струму, що утримують індуктивність і ємність, можна зробити висновок: явища ці подібні між собою, але немовби протилежні за знаком; у перших із них струм відстає від напруги, у других – струм випереджує напругу. В зв'язку з цим при всякого роду розрахунках – алгебраїчних і тригонометричних – зручно прийняти такий порядок: індуктивний опір X_L вважати позитивною величиною, а ємнісний опір X_C - негативною (від'ємною); кут зсуву фаз в колах з індуктивністю (на векторних діаграмах відкладається за часовою стрілкою від вектора напруги) – додатнім кутом, а кут φ в колах з ємністю (на векторних діаграмах відкладається в протилежний бік) – від'ємним.

Приклад 4.9. Розрахувати опір конденсатора ємністю 5 мкФ при частоті змінного струму 400 Гц. Знайти частоту змінного струму, при якій конденсатор ємністю 1мкФ має опір 1 кОм.

Розв'язання.

1. Опір конденсатора

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{12560} = 79,6 \text{ Ом.}$$

2. Із формули ємнісного опору знаходимо частоту

$$X_C \cdot 10^3 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot f \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot f \cdot 1};$$

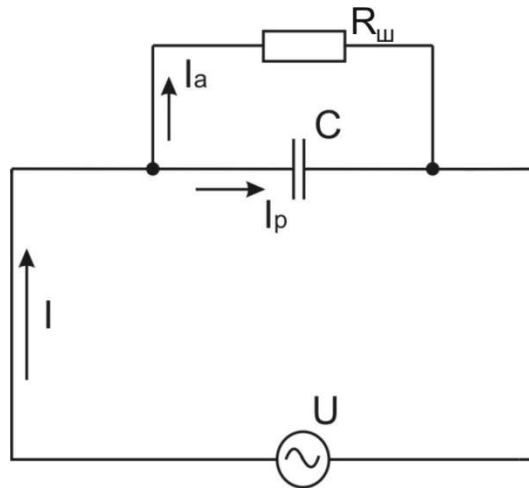
$$f = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^3} = 159 \text{ Гц.}$$

Приклад 4.10. До промислової мережі змінного струму частотою 50Гц і напругою 220 В підключений конденсатор ємністю 10 мкФ з

шунтуючим активним опором 1 кОм. Виконати відповідні розрахунки і побудувати трикутник провідностей конденсатора і векторну діаграму струмів, у відповідності до схеми заміщення.

Розв'язання.

1. Схема заміщення кола має вигляд



де $U = 220\text{В}$;

$C = 10\text{мкФ}$;

$R_{ш} = 10^3\text{Ом}$;

I – загальний струм через конденсатор;

I_p – реактивна складова струму через конденсатор;

I_a – активна складова струму через конденсатор.

2. Опір конденсатора:

Конденсатор у колі змінного струму має реактивний опір, обернено пропорційний його ємності та кутовій частоті:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{3140} = 318,5\text{Ом}$$

3. Провідності конденсатора:

а) реактивна (ємнісна) провідність конденсатора при промисловій частоті 50Гц

$$b_C = \frac{1}{X_C} = \omega C = 3,14 \cdot 10^{-3}\text{См};$$

б) реальні конденсатори мають також шунтуючий активний опір $R_{ш}$ і величина активної провідності буде

$$g = \frac{1}{R_{ш}} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3}\text{См};$$

в) повна провідність конденсатора визначається із співвідношення

$$Y_C = \sqrt{g^2 + b_C^2} = \sqrt{(10^{-3})^2 + (3,14 \cdot 10^{-3})^2} = 10^{-3} \sqrt{1 + 9,86} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

Розрахунок кін змінного струму, що утримують ємності та індуктивності, а також для побудовання потенціальних та векторних діаграм, більш доцільно і зручно використовувати комплексний метод (див. п.4.1.3.11).

Комплексне значення повної провідності конденсатора буде:

$$\dot{Y}_C = g + jb_C = 10^{-3} + j3,14 \cdot 10^{-3} = Y_C \cdot e^{j\alpha} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j72^\circ},$$

де $Y_C = \sqrt{g^2 + b_C^2} = 3,3 \cdot 10^{-3}$ – модуль комплексного числа \dot{Y}_C ;

$$\alpha = \arctg \frac{b_C}{g} = \arctg 3,14 = 72^\circ \text{ – аргумент комплексного числа } \dot{Y}_C.$$

Значення g і b_C визначають собою катети трикутника провідностей, гіпотенуза якого Y_C .

4. Струми реального конденсатора:

а) як відомо, енергія джерела у конденсаторі не витрачається, а йде на утворення електричного поля між пластинами при зарядженні конденсатора і повертається назад у джерело при його розрядженні. Через це для змінного струму конденсатор являється реактивним опором. Струм конденсатора випереджує напругу на кут $\pi/2$ (90°), тобто в комплексному вигляді,

$$I_p = U\omega C \cdot e^{j90^\circ} = 220 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j90^\circ} = 0,7 \cdot e^{j90^\circ} \text{ А.}$$

б) активний струм резистора

$$I_a = \frac{U}{R} = \frac{220}{10^3} = 0,22 \text{ А,}$$

в) загальний струм конденсатора

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{0,22^2 + 0,7^2} = 0,73 \cdot e^{j72,5^\circ} \text{ А;}$$

$$\alpha = \arctg \frac{0,7}{0,22} = 72,5^\circ.$$

5. Будуємо трикутник провідностей і векторну діаграму струмів.

$$\text{масштаб провідностей: } m_{np.} = \frac{10^{-3} \text{ См}}{\text{см}}$$

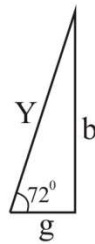
$$\text{масштаб струмів: } m_I = \frac{0,2 \text{ А}}{\text{см}}$$

Довжина відрізків провідностей

$$l_g = \frac{10^{-3} \cdot C_m \cdot c_m}{10^{-3} C_m} = 1 c_m$$

$$l_{bc} = \frac{3,14 \cdot 10^{-3} C_m \cdot c_m}{10^{-3} C_m} = 3,14 c_m$$

$$l_{Yc} = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} C_m \cdot c_m}{10^{-3} C_m} = 3,3 c_m$$



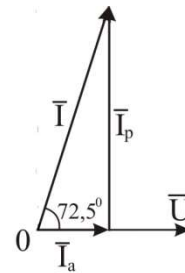
трикутник провідностей

Довжина векторів струмів

$$I_a = \frac{0,22 A \cdot c_m}{0,2 A} = 1,1 c_m$$

$$I_p = \frac{0,7 A \cdot c_m}{0,2 A} = 3,5 c_m$$

$$I_{заг.} = \frac{0,73 A \cdot c_m}{0,2 A} = 3,65 c_m$$



векторна діаграма струмів

Згідно з другим законом Кіргофа, рівняння для миттєвих значень напруги у колі (рис. 4.13, а) має вигляд

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (4.43)$$

Оскільки в даному випадку для всіх ділянок кола струм однаковий, то доцільно, щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю, тобто $\psi_i = 0$. Тоді, виразивши в (4.43) напругу через струм і опори ділянок кола, одержимо

$$u = I_m R \sin \omega t + I_m X_L \sin(\omega t + \pi / 2) + I_m X_C \sin(\omega t - \pi / 2). \quad (4.44)$$

Відомо, що напруга на резистивному елементі збігається по фазі зі струмом, на індуктивному елементі напруга випереджує струм на кут $\pi / 2$, а напруга на ємності відстає від струму на кут $\pi / 2$.

Якщо $X_L > X_C$, то $U_L > U_C$, оскільки $U_L = IX_L$, а $U_C = IX_C$. Інакше кажучи, якщо у колі переважає індуктивний опір, то напруга випереджує струм на кут φ (рис. 4.13, б) і миттєве значення напруги кола можна описати виразом $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

4.2.3.6. Послідовне з'єднання резистора R , індуктивності L і ємності C у колі синусоїдного струму

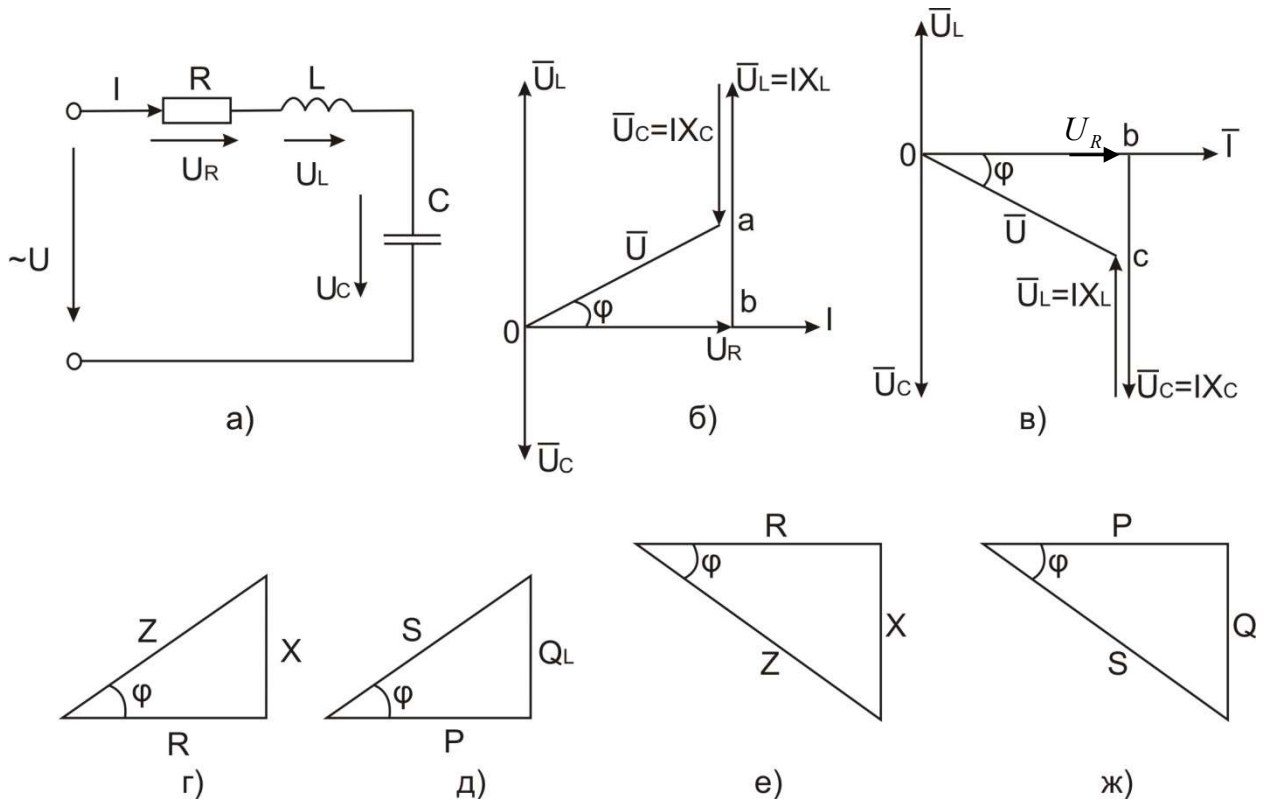


Рис. 4.13. Коло з послідовним з'єднанням елементів R, L, C :

- а) – схема заміщення кола;**
- б) – векторна діаграма напруг, коли $X_L > X_C$;**
- в) – векторна діаграма напруг, коли $X_C > X_L$;**
- г), д) – трикутники опорів і потужностей, коли $X_L > X_C$;**
- е), ж) – трикутники опорів і потужностей, коли $X_C > X_L$**

Якщо $X_C > X_L$, то $U_C > U_L$. Інакше кажучи, якщо у колі переважає ємнісний опір, то напруга відстає від струму на кут φ (рис. 4.13, в) і вираз для миттєвого значення напруги у колі має вигляд $u = U_m \sin(\omega t - \varphi)$. Трикутники $0ab$ і $0bc$ на векторних діаграмах напруг (рис. 4.13, б, в) називають трикутниками напруг.

У загальному вигляді вираз для миттєвого значення напруги в колі можна записати так:

$$u = U_m \sin(\omega t \pm \varphi).$$

З урахуванням цього запису рівняння (4.44) приймає вигляд

$$U_m \sin(\omega t \pm \varphi) = I_m R \sin \omega t + I_m X_L \sin(\omega t + \pi / 2) + I_m X_C \sin(\omega t - \pi / 2)$$

Якщо покласти у цьому рівнянні $\omega t = \pi / 2$ і $\omega t = 0$, одержимо

$$U_m \cos \varphi = I_m R; \pm U_m \sin \varphi = I_m (X_L - X_C).$$

Піднесенням першої і другої рівності до квадрату, а потім, їх складанням, маємо

$$U_m^2 = [R^2 + (X_L - X_C)^2], \text{ звідки находимо}$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (4.45)$$

Розділивши ліву і праву частину рівності (4.45) на $\sqrt{2}$, знайдемо зв'язок між струмом і напругою, тобто закон Ома для кола з послідовним з'єднанням R, L, C :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}} = \frac{U}{z}, \quad (4.46)$$

де $z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$ - повний опір кола з R, L, C , елементами;

$X = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C$ - реактивний опір кола, що враховує реакцію самоіндукції та ємності.

Якщо кожен із сторін трикутника напруг розділити на струм I , то одержимо трикутник опорів. Сторони трикутника опорів являють собою відрізки, а не вектори, оскільки опори – величини постійні. Трикутник опорів дозволяє без розрахунку і побудови векторної діаграми визначити $\cos \varphi$. На рис. 4.13, г зображений трикутник опорів, коли у колі $X_L > X_C$, а на рис. 4.13, е – коли $X_C > X_L$.

Помноживши сторони трикутників напруги (рис. 4.13, б, в) на струм, одержимо трикутники потужностей. На рис. 4.13, д зображений трикутник потужностей. Якщо у колі $X_L > X_C$, а на рис. 4.13, ж – якщо $X_C > X_L$.

Із трикутників потужностей маємо

$$P = U_R I = UI \cos \varphi = I^2 R, \text{ Вт} - \text{ активна потужність кола;}$$

$Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = I^2 (X_L - X_C) = I^2 X = UI \sin \varphi$, вар – реактивна потужність кола;

$$S = UI = I^2 R = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА} - \text{ повна потужність кола;}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{z} = \frac{P}{S} - \text{ коефіцієнт потужності кола;}$$

$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg [(X_L - X_C)/R]$ - кут зсуву фаз між струмом і напругою у колі. Кут φ додатній, коли реактивний опір X має

індуктивний характер, тобто коли $X_L > X_C$. Кут φ – від’ємний, коли реактивний опір X має ємнісний характер, тобто коли $X_C > X_L$.

Слід відмітити, що реактивна і повна потужності мають ту ж саму розмірність, що і активна. Але з метою зручності для реактивної і повної потужностей вибрані свої одиниці: вольт-ампер реактивний (вар) і вольт-ампер (ВА) відповідно. Часто в енергетиці використовуються похідні одиниці: кіловольт-ампер реактивний (квар), кіловольт-ампер (кВА).

4.2.3.7. Послідовний коливальний контур. Резонанс напруг

Послідовним коливальним контуром називають таке коло, в якому котушка і конденсатор з’єднані послідовно відносно вхідних затискачів (рис. 4.14). В такому колі можна спостерігати резонанс напруг. При резонансі напруг індуктивний і ємнісний опори взаємно компенсуються і в результаті цього реактивні опори і реактивна потужність дорівнюють нулю.

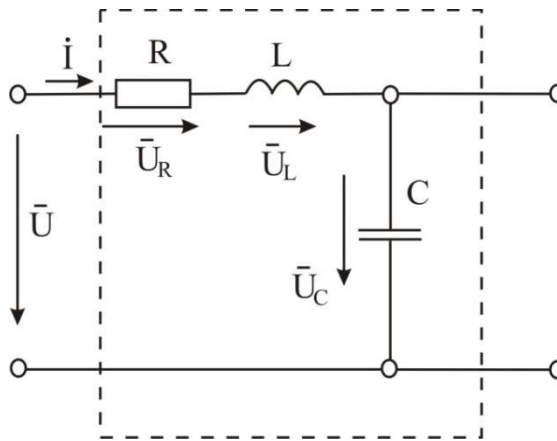


Рис. 4.14. Коливальний контур при послідовному з’єднанні елементів RLC

У резонансі напруг струм і напруга у колі співпадають за фазою. В такому разі кут зсуву фаз між струмом і напругою у колі дорівнює нулю ($\varphi = 0$) і повний опір кола дорівнює його активному опорі. Якщо $\varphi = \arctg(X/R)$, то кут $\varphi = 0$ при $X = 0$. Отже, при резонансі $z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$ і $X_L - X_C = 0$, $X_L = X_C$, оскільки $X_L = \omega L$, а $X_C = 1/\omega C$, то $\omega L = 1/(\omega C)$, звідки кутова частота при резонансі

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (4.47)$$

і резонансна частота

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})}$$

Таким чином, основною умовою виникнення резонансу напруг у колі являється рівність реактивних опорів $X_L = X_C$, оскільки тільки в такому разі частота коливального контуру ω_0 дорівнює частоті мережі ω , що живить дане коло.

Отже, індуктивний і ємнісний опори при резонансі рівні, тобто

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{L/C} = \rho, \quad (4.48)$$

тому що $\omega_0 L = L / \sqrt{LC} = \sqrt{L/C}$ і $1 / \omega_0 C = \sqrt{LC/C^2} = \sqrt{L/C}$.

Величину ρ називають характеристичним опором контуру.

Відношення напруги на індуктивності або на ємності до напруги, що прикладена до кола при резонансі, називають добротністю контуру або коефіцієнтом резонансу:

$$Q = U_L / U = U_C / U = \rho I / RI = \rho / R, \quad (4.49)$$

$$\text{звідки } QU = U_L = U_C.$$

Коефіцієнт резонансу показує, в скільки разів напруга на індуктивних або ємнісних елементах при резонансі більше, чим напруга мережі, що прикладена до кола.

Розглянемо схему рис.4.14 без навантаження ($U_C = U_{cx.x.}$). Тоді струм у колі

$$I = \frac{U}{z} = U / \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

оскільки $X_L = X_C$, струм при резонансі напруг визначиться за формулою,

$$I_p = U / R. \quad (4.50)$$

Струм у колі при резонансі напруг буде значно більшим за струм у колі в разі відсутності резонансу, тому що при резонансі його значення обмежене тільки опором R . При резонансі напруга на індуктивності та ємності, за великих значень порівняно із R реактивних опорів X_L і X_C чисельно може бути в багато разів більшою напруги мережі живлення.

$$U_{L0} = U_{C0} = I_0 X_L = I_0 X_C.$$

Напруга на активному опорі при резонансі дорівнює напрузі, прикладеній до затискачів кола:

$$U_R = I_0 R = U.$$

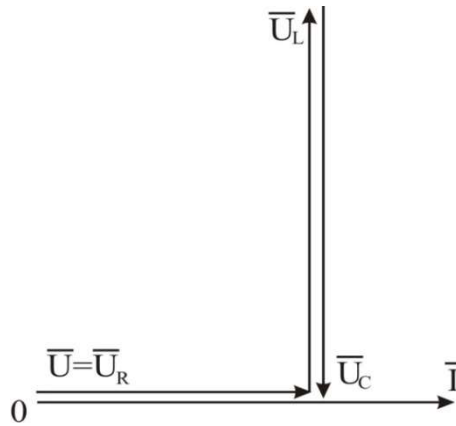


Рис. 4.15. Векторна діаграма напруг при резонансі

На рис.4.15 наведена векторна діаграма напруг кола, що зображена на рис.4.14 при резонансі напруг. Оскільки при резонансі $X_L = X_C = 0$, то в такому разі і $\bar{U}_L - \bar{U}_C = \overline{IX}_L - \overline{IX}_C = 0$.

Слід відмітити, що властивість підсилення напруги на реактивних елементах – є важливою особливістю резонансу напруг. Це явище широко використовується в радіо- та електротехніці в системах захисту силових мереж і потужних електроустановок. Разом з тим значне підвищення напруги на реактивних елементах при резонансі може призвести до пробиття ізоляції і виникнення короткого замикання, що в свою чергу призведе до значного збільшення струму, перегрівання провідників і до пожежі.

Підвищення напруги також небезпечно для обслуговуючого персоналу. Необережне поводження з таким електрообладнанням може привести до електротравми (нагадаємо, що небезпечна напруга змінного струму для життя людини 42 В і більше).

Розглянемо енергетичні процеси, що спостерігаються у даному колі при резонансі напруг. Для цього визначимо суму миттєвих значень магнітного і електричного полів кола, тобто $W = W_L + W_C$. Якщо прийняти при резонансі струм в контурі $i = I_m \sin \omega_0 t$, то напруга на ємності $U_c = U_{cm} \sin(\omega_0 t - \pi/2) = -U_{cm} \cos \omega_0 t$.

$$\begin{aligned}
 W &= W_L + W_C = \frac{Li^2}{2} + \frac{CU_c^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_0 t + \frac{CU_{cm}^2}{2} \cos^2 \omega_0 t = \\
 &= \frac{LI_m^2}{2} (\sin^2 \omega_0 t + \cos^2 \omega_0 t) = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_{cm}^2}{2} = const.
 \end{aligned}
 \tag{4.51}$$

Отже, при резонансі напруг сумарна енергія магнітного і електричного полів залишається постійною, при цьому безперервно відбувається перерозподіл енергії магнітного і електричного полів, тобто збільшення енергії магнітного поля супроводжується зменшенням енергії електричного поля і навпаки.

Таким чином, енергія початково накопичена в контурі від джерела (мережі), коливається при резонансі між індуктивністю та ємністю, причому без участі в цьому процесі джерела. Через це такий контур називається коливальним.

Таким чином, при резонансі на долю джерела залишається лише покриття витрат енергії в активному опорі; отже, повна або загальна потужність дорівнює активній потужності

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P,$$

оскільки реактивна потужність при резонансі дорівнює нулю:

$$Q = Q_L - Q_C = U_L I - U_C I = 0,$$

де $U_L = U_C$.

Коефіцієнт потужності при резонансі

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = 1.$$

Приклад 4.11. До мережі змінного струму з напругою $U=220$ В і частотою $f=50$ Гц приєднано послідовне коло, що складається з активного опору $R=30$ Ом, індуктивності $L=382$ мГн і ємності $C=40$ мкФ.

Визначити індуктивний, ємнісний і повний опори кола; силу струму в колі; активну, індуктивну і ємнісну складові напруги; активну, реактивну і повну потужності кола.

Розв'язання.

1. Індуктивний опір кола

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,382 = 120 \text{ Ом.}$$

2. Ємнісний опір

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 40} = 80 \text{ Ом.}$$

3. Повний опір

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{30^2 + (120 - 80)^2} = 50 \text{ Ом.}$$

4. Сила струму в колі

$$I = \frac{U}{z} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А.}$$

5. Активна складова напруги

$$U_a = IR = 4,4 \cdot 30 = 132 \text{ В.}$$

6. Індуктивна складова напруги

$$U_L = IX_L = 4,4 \cdot 120 = 528 \text{ В.}$$

7. Ємнісна складова напруги

$$U_C = IX_C = 4,4 \cdot 80 = 352 \text{ В.}$$

8. Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = \frac{R}{z} = \frac{30}{50} = 0,6$$

Коефіцієнту потужності $\cos \varphi = 0,6$ відповідає кут зсуву фаз $\varphi = 53^{\circ}10'$, синус якого $\sin \varphi = 0,8$.

9. Активна потужність

$$P = UI \cos \varphi = 220 \cdot 4,4 \cdot 0,6 = 581 \text{ Вт.}$$

10. Реактивна потужність

$$Q = UI \sin \varphi = 220 \cdot 4,4 \cdot 0,8 = 774 \text{ вар.}$$

11. Повна потужність

$$S = UI = 220 \cdot 4,4 = 968 \text{ ВА.}$$

Приклад 4.12. Для нерозгалуженого електричного кола змінного струму з котушкою індуктивності L і конденсатора C визначити частоту f , струм I у колі, напругу на затискачах індуктивності U_L і на затискачах конденсатора U_C при резонансі напруг. Розрахувати ці ж значення при частоті f' , що дорівнює 0,8 від резонансної f , побудувати векторну діаграму струму I і напруг: U_K ; U_L ; U_C ; U при цій частоті, якщо індуктивність котушки $L = 1,5 \text{ Гн}$, ємність конденсатора $C = 42 \text{ мкФ}$, активний опір котушки $R = 50 \text{ Ом}$, діюча напруга у колі $U = 100 \text{ В}$.

Розв'язання.

1. Резонансна частота кола:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{1,5 \cdot 42 \cdot 10^{-6}}} = 0,1595 \sqrt{\frac{10^6}{63}} = 20 \text{ Гц.}$$

2. Струм у колі при резонансі:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{50} = 2 \text{ А.}$$

3. Напруга на затискачах котушки при резонансі:

$$\begin{aligned} U_K &= z_K I = I \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = I \sqrt{R_K^2 + (\omega L)^2} = \\ &= 2 \sqrt{50^2 + (6,28 \cdot 20 \cdot 1,5)^2} = 2 \sqrt{50^2 + 189^2} = 2 \cdot 195,3 = 390 \text{ В} \end{aligned}$$

4. Те ж саме, активна складова напруги:

$$U_K = RI = 50 \cdot 2 = 100 \text{ В,}$$

5. реактивна складова напруги:

$$U_L = X_L I = \omega L I = 6,28 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 2 = 378 \text{ В.}$$

6. Напряга на конденсаторі:

$$U_C = I \frac{1}{\omega C} = 2 \frac{1}{6,28 \cdot 42 \cdot 10^{-6}} = 378 \text{ В.}$$

7. Згідно з умовою задачі, значення пониженої частоти:

$$f' = 0,8f = 0,8 \cdot 20 = 16 \text{ Гц.}$$

8. За пониженою частотою:

реактивний опір котушки індуктивності:

$$X'_L = \omega' L = 2\pi f' L = 6,28 \cdot 16 \cdot 1,5 = 150,72 \text{ Ом;}$$

реактивний опір конденсатора:

$$X'_C = \frac{1}{\omega' C} = \frac{1}{6,28 \cdot 16 \cdot 42 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{4220} = 237 \text{ Ом;}$$

повний опір котушки індуктивності

$$z'_K = \sqrt{R^2 + (\omega' L)^2} = \sqrt{50^2 + (150,72)^2} = 162 \text{ Ом;}$$

повний опір кола:

$$z' = \sqrt{R^2 + \left(\omega' L - \frac{1}{\omega' C}\right)^2} = \sqrt{50^2 + (150,72 - 237)^2} = 100 \text{ Ом;}$$

9. Струм у колі:

$$I = \frac{U}{z'} = \frac{100}{100} = 1 \text{ А;}$$

10. Напряга на котушці: $U_K = Z'_K I = 162 \cdot 1 = 162 \text{ В;}$

напряга на конденсаторі: $U_C = X'_C I = 237 \cdot 1 = 237 \text{ В;}$

11. Повна потужність кола:

$$S = UI = 100 \cdot 1 = 100 \text{ ВА;}$$

активна потужність кола

$$P = I^2 R = 1 \cdot 50 = 50 \text{ Вт;}$$

реактивна потужність кола

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{100^2 - 50^2} = \sqrt{7500} = 87 \text{ вар;}$$

12. Коефіцієнт потужності установки:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{50}{100} = 0,5.$$

13. Будуємо векторну діаграму при частоті мережі $f = 16$ Гц.

Напряга на активному опорі:

$$U_R = IR = 1 \cdot 50 = 50 \text{ В.}$$

Напряга на індуктивності

$$U_L = IX'_L = 1 \cdot 150,72 = 150,72 \text{ В}$$

Напряга на ємності, за розрахунком

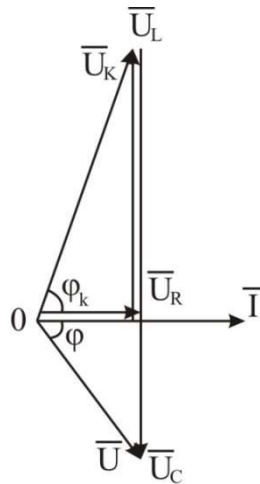
$$U_C = 237 \text{ В.}$$

$$\text{Масштаб напруг } m_U = \frac{40 \text{ В}}{\text{см}}$$

$$\text{Довжина векторів: } l_{U_R} = \frac{50}{40} = 1,25 \text{ см.}$$

$$l_{U_L} = \frac{150,72}{40} = 3,8 \text{ см.}$$

$$l_{U_C} = \frac{237}{40} = 5,9 \text{ см.}$$



Векторна діаграма до задачі 4.11.

4.2.3.8. Електричне коло з паралельним з'єднанням активних та реактивних (індуктивних) опорів

Розглянемо коло, що складається із двох споживачів (двох котушок індуктивності), кожна з яких має свій активний та індуктивний опори (рис.4.16, а).

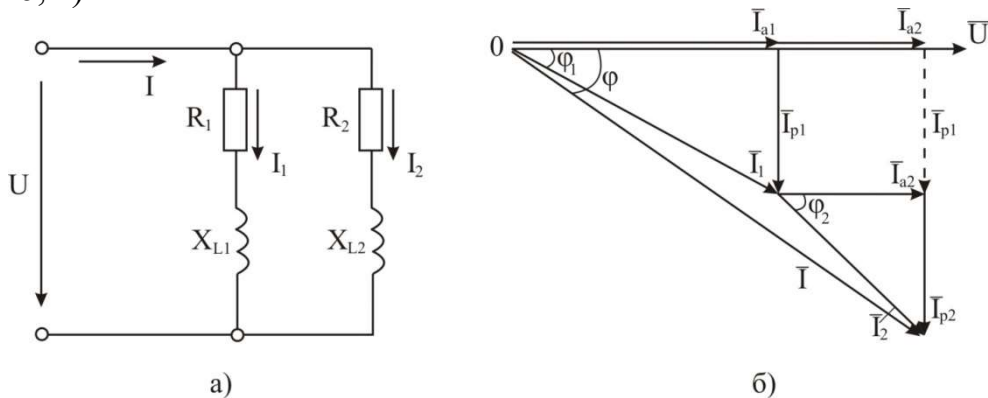


Рис. 4.16. Розгалужене коло з паралельним з'єднанням активного та індуктивного опорів:

а) – схема кола; б) – векторна діаграма

Струм у першій котушці індуктивності

$$I_1 = \frac{U}{z_1},$$

де $z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}$ - повний опір першої котушки.

Цей струм відстає за фазою від напруги (рис. 4.16, б) на кут, тангенс якого визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{X_{L1}}{R_1}.$$

Струм у другій котушці індуктивності

$$I_2 = \frac{U}{z_2},$$

де $z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}$ - повний опір другої котушки індуктивності. Цей струм відстає за фазою від напруги на кут, тангенс якого визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_{L2}}{R_2}.$$

Для визначення струму у нерозгалуженій частині кола розкладемо вектор струму кожної паралельної вітки на дві складові, як показано на рис. 4.16, б. Одна з складових вибирається такою, що по фазі збігається з напругою. Її позначають I_a і називають активною складовою. Друга складова вибирається зсунутою по фазі на 90° відносно напруги. Її позначають I_p і називають реактивною складовою. Таким чином, для першої паралельної вітки можна написати

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 \text{ і } I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1,$$

$$\text{де } \cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1}; \sin \varphi_1 = \frac{X_{L1}}{z_1}.$$

Сила струму I_1 і його складові I_{a1} і I_{p1} зв'язані між собою таким самим співвідношенням, як сторони прямокутного трикутника - трикутника струмів (рис. 4.16, б).

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}.$$

Для другої паралельної вітки можна написати:

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2; I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2$$

$$\text{де } \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2}; \sin \varphi_2 = \frac{X_{L2}}{z_2}.$$

Як впливає з векторної діаграми, активна складова сили струму до розгалуження

$$I_a = I_{a1} + I_{a2},$$

реактивна складова сили струму до розгалуження

$$I_p = I_{p1} + I_{p2}.$$

Сила струму до розгалуження

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (4.52)$$

Кут зсуву фази струму I відносно напруги можна визначити за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a}.$$

Активна потужність кола визначається як сума активних потужностей окремих віток

$$P = P_1 + P_2 = UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos \varphi_2,$$

або за формулою $P = UI \cos \varphi$.

Реактивна потужність кола

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI_1 \sin \varphi_1 + UI_2 \sin \varphi_2, \text{ або}$$

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Повна потужність кола

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI.$$

Приклад 4.13. В мережу змінного струму напругою 120 В і частотою 50 Гц паралельно ввімкнено два приймачі. Перший приймач має активний опір $R_1 = 4$ Ом та індуктивність $L_1 = 9,6$ мГн, а другий – активний опір $R_2 = 6$ Ом та індуктивність $L_2 = 25,5$ мГн. Визначити силу струму першого і другого приймачів у нерозгалуженій частині кола, коефіцієнт потужності кола, потужність, яку споживає кожен приймач і все коло.

Розв'язання.

1. Індуктивний опір першого приймача

$$X_{L1} = 2\pi fL_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 3 \text{ Ом.}$$

2. Повний опір першого приймача

$$z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}$$

3. Струм першого приймача

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{120}{5} = 24 \text{ А.}$$

4. Коефіцієнт потужності першого приймача

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1} = \frac{4}{5} = 0,8; \quad \varphi_1 = 36^\circ 50'; \quad \sin \varphi_1 = 0,6.$$

5. Активна складова сили струму першого приймача

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = 24 \cdot 0,8 = 19,2 \text{ А.}$$

6. Реактивна складова сили струму першого приймача

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = 24 \cdot 0,6 = 14,4 \text{ А.}$$

7. Індуктивний опір другого приймача

$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ Ом.}$$

8. Повний опір другого приймача

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом.}$$

9. Сила струму другого приймача

$$I_2 = \frac{U_2}{z} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А.}$$

10. Коефіцієнт потужності другого приймача

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2} = \frac{6}{10} = 0,6; \varphi_2 = 52^{\circ}10', \sin \varphi_2 = 0,8.$$

11. Активна складова сили струму другого приймача

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 12 \cdot 0,6 = 7,2 \text{ А.}$$

12. Реактивна складова сили струму другого приймача

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 12 \cdot 0,8 = 9,6 \text{ А.}$$

13. Активна складова сили струму до розгалуження

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 19,2 + 7,2 = 26,4 \text{ А.}$$

14. Реактивна складова сили струму до розгалуження

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = 14,4 + 9,6 = 24 \text{ А.}$$

15. Сила струму до розгалуження

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{26,4^2 + 24^2} \approx 36 \text{ А.}$$

16. Коефіцієнт потужності кола

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} = \frac{26,4}{36} \approx 0,733$$

17. Активна потужність першого приймача

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1 = 120 \cdot 24 \cdot 0,8 = 2304 \text{ Вт.}$$

18. Активна потужність другого приймача

$$P_2 = UI_2 \cos \varphi_2 = 120 \cdot 12 \cdot 0,6 = 864 \text{ Вт.}$$

19. Активна потужність всього кола

$$P = P_1 + P_2 = 2304 + 864 = 3168 \text{ Вт} \\ \text{або} \approx 3 \text{ кВт.}$$

4.2.3.9. Паралельне з'єднання реальної котушки та конденсатора.

Розглянемо коло, що складається з паралельно з'єднаних котушки, яка має активний опір R та індуктивність L , і конденсатора ємністю C (рис. 4.17, а).

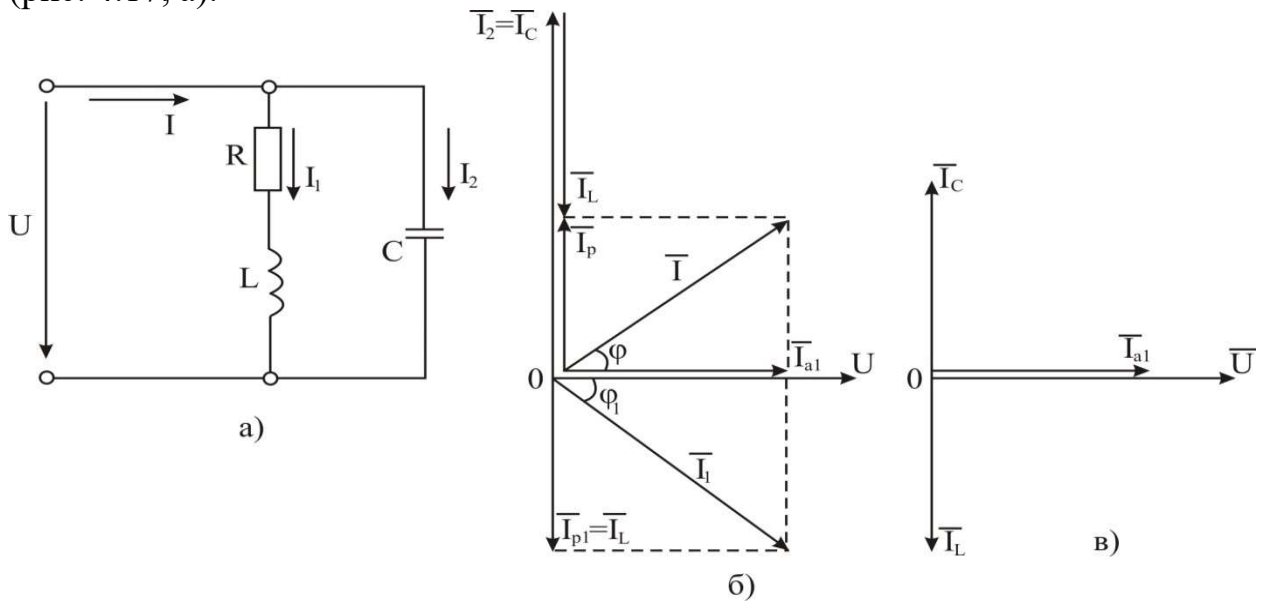


Рис. 4.17. Паралельне з'єднання котушки і конденсатора:

а) – схема кола; б) – векторна діаграма при $I_C > I_L$;

в) – векторна діаграма при $I_C = I_L$

Діюче значення струму в котушці

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}}.$$

Цей струм відстає по фазі від напруги на кут (рис. 4.17, б), косинус і синус якого

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1}; \quad \sin \varphi_1 = \frac{X_{L1}}{z_1}.$$

Активна складова сили струму в котушці

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1.$$

Реактивна складова сили струму в котушці

$$I_{p1} = I_L = I_1 \sin \varphi_1.$$

У вітці з конденсатором струм I_2 випереджає прикладену напругу на кут 90° ; його величина

$$I_2 = I_C = \frac{U}{X_C} = U \omega C.$$

Для визначення сили струму до розгалуження розглянемо векторну діаграму (рис. 4.17, б), на якій сила загального струму знайдена як геометрична сума сил струмів I_1 та I_2 :

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \text{ або } I = \sqrt{I_{a1}^2 + (I_L - I_C)^2}, \quad (4.53)$$

оскільки $I_a = I_{a1}$; $I_p = I_L - I_C$.

Кут зсуву струму по фазі до розгалуження відносно напруги можна визначити за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_{a1}} = \frac{I_L - I_C}{I_{a1}}. \quad (4.54)$$

Струм до розгалуження може відставати на кут φ від напруги кола, якщо $I_L > I_C$, або випереджувати його, якщо $I_C > I_L$, або збігатися по фазі з напругою, якщо $I_L = I_C$ (рис. 4.17, в). В останньому випадку в колі настає явище, яке називається резонансом струмів. При резонансі струмів $I_p = 0$; $I = I_a$; $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

Активна потужність P дорівнює повній потужності кола, тобто $P = UI \cos \varphi = UI = S$.

Реактивна потужність Q при резонансі струмів дорівнює нулю: $Q = Q_L - Q_C = UI_{L0} \sin \varphi - UI_{C0} \sin \varphi = 0$, так як $I_{L0} = I_{C0}$ і $\sin \varphi = 0$.

Таким чином, при резонансі струмів коло не споживає із мережі реактивну енергію. Енергетичні процеси, що спостерігаються в паралельному контурі, аналогічні процесам, які відбуваються при резонансі напруг. В контурі відбувається неперервний взаємний обмін енергіями між ємнісним і індуктивним елементами кола, а мережа лише компенсує енергію, що втрачається в активних опорах кола. Явище резонансу струмів широко використовується в електро- і радіотехніці.

Із визначення резонансу струмів випливає, що при резонансі провідності віток з індуктивністю b_L і ємністю b_C повинні бути рівні між собою, тобто $b_L = b_C$.

В свою чергу $b_L = X_L / z_1^2$; $b_C = X_C / z_2^2$, прирівнявши ці значення маємо:

$$\frac{\omega'_0 L}{R_1^2 + (\omega'_0 L)^2} = \frac{1 / \omega'_0 C}{R_2^2 + (1 / \omega'_0 C)^2}, \quad (4.55)$$

де ω'_0 – кругова частота резонансу струмів.

Після відповідних перетворень (4.55) з урахуванням того, що в схемі (рис.4.17а) опір $R_2 = 0$

$$\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R^2}{L/C}}. \quad (4.56)$$

Кругова частота $\omega'_0 = 2\pi f_0$, підставляючи це значення в (4.56) і розв'язавши його відносно f_0 одержимо значення резонансної частоти, f_0 .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}. \quad (4.57)$$

Із формули (4.57) випливає, що резонансна частота f_0 при резонансі струмів залежить не тільки від параметрів реактивних елементів L , C , але і від активних опорів, якщо вони мають місце у схемі.

Для схеми Рис. 4.17, а струм у вітках

$$I_1 = \sqrt{g_1^2 + b_L^2} \cdot U; \quad I_2 = b_C \cdot U.$$

Якщо $b_L > g_1$, а $b_C > g_2$ - (при наявності активного опору R_2 у вітці з конденсатором), тобто $X_L \gg R_1, X_C \gg R_2$, то $I_{p1} \gg I_{1a}, I_{p2} \gg I_{2a}$, і $I_1 \gg I, I_2 \gg I$, тобто струми у вітках значно більші, чим струм в нерозгалуженій частині кола. Ця особливість – збільшення струму – являється важливішою особливістю резонансу струмів і широко використовується на практиці.

Приклад 4.14. Для схеми, що зображена на рис. 4.17а, визначити резонансну частоту f_0 , повний опір Z і струми I, I_1, I_2 , побудувати векторну діаграму для резонансної частоти в електричному колі. Індуктивність котушки $L = 0,5$ Гн, активний опір резистора $R = 30$ Ом, ємність конденсатора $C = 50$ мкФ, напруга мережі живлення $U = 60$ В.

Розв'язання.

1. Резонансна частота за формулою (4.57):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{10^6}{0,5 \cdot 50} - \frac{30^2}{0,5^2}} = 30,4 \text{ Гц.}$$

2. Провідності першої паралельної вітки:

$$\text{активна } g_1 = \frac{R}{z_1^2} = \frac{R}{\left(\sqrt{R^2 + X_L^2}\right)^2} = \frac{30}{30^2 + 95,2^2} = 0,003 \text{ См,}$$

де $X_L = 2\pi f_0 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 30,4 \cdot 0,5 = 95,2$ Ом.

$$\text{реактивна } b_L = \frac{X_L}{z_1^2} = \frac{95,2}{30^2 + 95,2^2} = 0,00952 \text{ См.}$$

3. Реактивна провідність другої паралельної вітки (активний опір відсутній):

$$b_C = \frac{X_C}{z_2^2} = \frac{X_C}{X_C^2} = \frac{1}{104,5} = 0,00952 \text{ См},$$

де $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 30,4 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 104,5 \text{ Ом}.$

4. Повна провідність кола:

$$Y = \sqrt{g_1^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{0,003^2 + (0,00952 - 0,00952)^2} = 0,003 \text{ См}.$$

5. Повний опір всього кола:

$$z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{0,003} = 334 \text{ Ом}.$$

6. Загальний струм у колі:

$$I = UY = 60 \cdot 0,003 = 0,18 \text{ А}.$$

7. Струми у вітках:

у першій вітці $I_1 = UY_1 = U \frac{1}{z_1} = 60 \frac{1}{\sqrt{30^2 + 95,2^2}} = 0,6 \text{ А},$

у другій вітці $I_2 = I_C = UY_2 = \frac{60}{X_C} = \frac{60}{104,5} = 0,574 \text{ А}.$

8. Складові струму першої вітки:

активна $I_{a1} = Ug_1 = I = 60 \cdot 0,003 = 0,18 \text{ А}.$

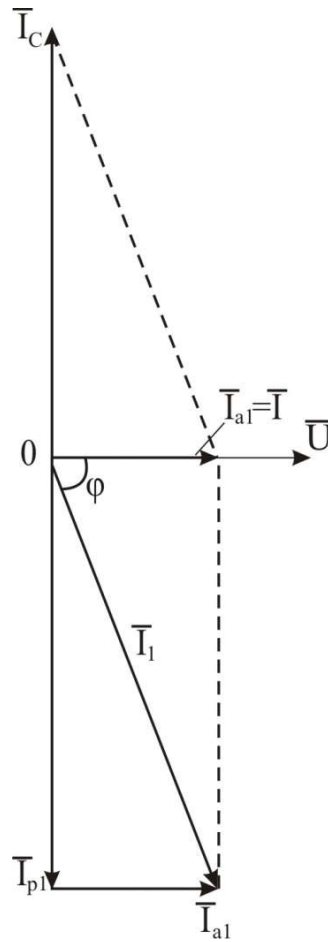
реактивна $I_{p1} = Ub_L = 60 \cdot 0,00952 = 0,574 \text{ А}.$

9. Реактивний струм другої вітки:

$$I_C = Ub_C = 60 \cdot 0,00952 = 0,574 \text{ А}.$$

10. Векторна діаграма при резонансі струмів приведена нижче.

Масштаб струму $\frac{0,14 \text{ А}}{\text{см}}.$



Векторна діаграма при резонансі струмів до прикладу 4.14.

4.2.3.10. Економічне значення коефіцієнта потужності й методи його підвищення

Економічне значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ полягає в тому, що від його величини відповідним чином залежать капітальні та експлуатаційні витрати, а також ефективність використання обладнання електричних установок.

На сучасних промислових підприємствах більшість споживачів електричної енергії змінного струму являють собою індуктивно-активне навантаження у вигляді асинхронних двигунів, силових і зварювальних трансформаторів, перетворювачів і багато інших. Активна потужність подібних споживачів окрім заданого навантаження залежить також і від $\cos \varphi$. Чим більший $\cos \varphi$, тим більша активна потужність, тим краще використовується встановлена потужність генератора чи трансформатора, що живить навантаження.

Так, наприклад, якщо номінальна потужність трансформатора $S = UI = 100$ кВА і до нього приєднано споживач із $\cos \varphi = 1$, то активна потужність $P_1 = UI \cos \varphi_1 = 100$ кВт. Якщо до цього трансформатора

приєднати споживач, що має $\cos \varphi_2 = 0,8$, то в цьому випадку активна потужність трансформатора становитиме тільки $P_2 = UI \cos \varphi_2 = 100 \cdot 0,8 = 80$ кВт і трансформатор буде недовантаженим і працюватиме з низьким ККД.

З другого боку, якщо споживач працює з постійною активною потужністю і постійною напругою, але з різним $\cos \varphi$, то сила струму його змінюється обернено пропорційно $\cos \varphi$

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Із зменшенням $\cos \varphi$ сила струму споживача збільшується. Збільшення сили струму спричиняє збільшенню втрат потужності у сполучних проводах.

Потужність теплових втрат, згідно закону Джоуля-Ленца, як відомо, пропорційна квадрату струму і опору проводів:

$$\Delta P = I^2 R_{\text{пр}}.$$

Отже, чим більший струм приймача, тим більші втрати енергії в електричному колі. Вартість втраченої енергії входить в експлуатаційні витрати. Збільшення $\cos \varphi$ споживачів призводить до зменшення струму, скорочення втрат енергії і скорочення експлуатаційних витрат.

Якщо електротехнічна установка запроектована з відносно низьким $\cos \varphi$, то обладнання (комутаційна апаратура, прилади контролю та інше) і проводи повинні бути вибрані на більші струми, ніж при високому $\cos \varphi$. Це означає, що обладнання повинно бути встановлено відносно більших розмірів, а проводи – більшого перерізу. Останнє викличе збільшення об'єму будівель і споруд, підвищення ваги фундаментів і опор ліній електропередач і т.п.

Ось чому прагнуть до того, щоб $\cos \varphi$ установки по можливості був близьким до одиниці.

На практиці коефіцієнт потужності електроустановки, що споживає електроенергію не залишається постійним: з часом змінюється навантаження електродвигунів, трансформаторів, змінюються окремі приймачі енергії (одні вимикаються, інші вмикаються) і т.д.

Через це миттєвим значенням $\cos \varphi$ характеризувати роботу установки не можна. Для цього користуються поняттям середньовиваженого $\cos \varphi$ за відповідний проміжок часу.

Середньовиважений коефіцієнт потужності визначається величинами активної і реактивної енергій, підрахованими за даний проміжок часу:

$$\cos \varphi_{cp} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}, \quad (4.58)$$

де

$$W_a = Pt = UIt \cos \varphi \text{ – активна енергія,} \quad (4.59)$$

$$W_p = Qt = UIt \sin \varphi \text{ – реактивна енергія.} \quad (4.60)$$

Кількісний вираз реактивної енергії за даний проміжок часу, записаний за аналогією з виразом активної енергії (4.59), є умовним, оскільки він не пов'язаний з втратою енергії і не визначає чисельне значення тієї енергії, якою обмінюються приймач і генератор за той самий проміжок часу. Проте використання величини W_p дозволяє визначити $\cos \varphi$ за показниками лічильників активної і реактивної енергії (формула 4.58).

Різниця показників лічильників на початку і в кінці даного періоду часу дає значення активної та реактивної енергії за даний період.

Величина середньовиваженого коефіцієнта потужності установки чи промислового підприємства в цілому залежить від правильного вибору двигунів, трансформаторів і дотримання правил їх експлуатації.

Враховуючи велике економічне значення коефіцієнта потужності, необхідно вживати відповідні заходи для його підвищення: в першу чергу, правильний вибір потужності двигунів змінного струму і трансформаторів і раціональна їх експлуатація, без недовантаження і роботи вхолосту, оскільки в холостому режимі асинхронного двигуна коефіцієнт його потужності становить 0,1-0,3. На практиці застосовують автоматичні обмежувачі холостого ходу (х. х.), які автоматично вимикають двигуни, якщо час х. х. перевищує 10 с.

Одним із основних заходів підвищення $\cos \varphi$ являється вмикання паралельно до приймачів батареї конденсаторів. Для визначення необхідної величини ємності і потужності батареї конденсаторів необхідно виконати розрахунок, вихідними даними якого являються:

P – активна потужність споживача (установки в цілому);

U – напруга мережі живлення;

$\cos \varphi_1$ і $\cos \varphi_2$ - середньовиважений коефіцієнт потужності до і після підвищення.

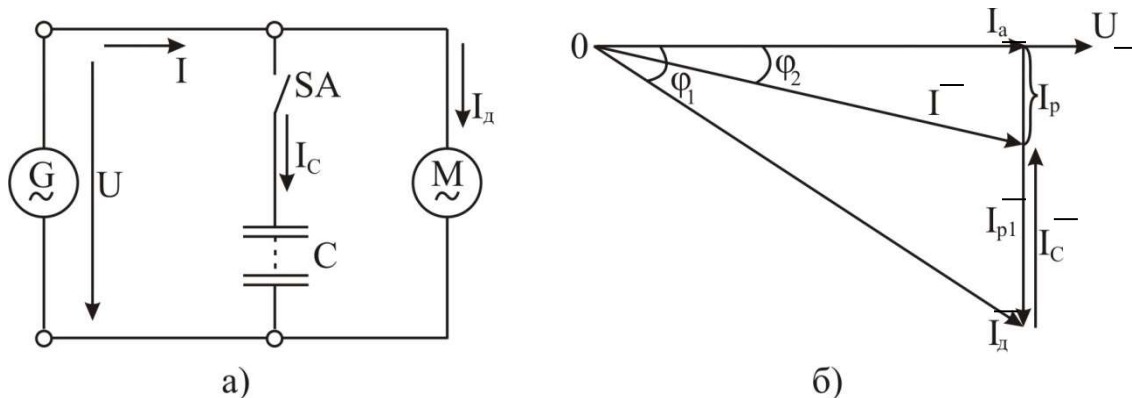


Рис. 4.18. Паралельне з'єднання двигуна і батареї конденсаторів:
а) – схема; б) – векторна діаграма

Метод розрахунку впливає із векторної діаграми, побудованої для схеми (рис. 4.18, а), на якій паралельно приймачу, наприклад, групі асинхронних двигунів, може бути приєднана конденсаторна батарея. До вмикання конденсаторів струм у сполучних проводах I_a відстає по фазі від напруги на кут φ_1 . Після вмикання батареї реактивна складова I_{p1} струму двигунів частково компенсується ємнісним струмом I_c , в зв'язку з чим струм у сполучних проводах зменшиться до величини I , а кут зсуву фаз до φ_2 (в обмінному енергетичному процесі між генератором і приймачем бере участь менша кількість електромагнітної енергії).

Активна складова струму у проводах не змінюється, отже, за активною потужністю режим роботи кола залишається попереднім (незмінним):

$$I \cos \varphi_2 = I_d \cos \varphi_1.$$

Щоб збільшити коефіцієнт потужності від $\cos \varphi_1$ до $\cos \varphi_2$ струм конденсатора повинен мати значення:

$$I_c = I_d \sin \varphi_1 - I \sin \varphi_2$$

$$I_d = \frac{P}{U \cos \varphi_1}; \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi_2};$$

$$I_c = \frac{P}{U} \left(\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} - \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} \right) = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Ємність конденсаторів [див. формулу (4.39)]:

$$C = \frac{I_c}{\omega U}. \quad (4.61)$$

Потужність конденсаторів

$$Q_c = UI_c. \quad (4.62)$$

Неважко помітити, що потужність конденсаторів можна визначити, не підраховуючи струм I_C :

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (4.63)$$

тоді

$$C = \frac{Q_C}{\omega U^2}.$$

І на завершення слід відмітити, що підвищення $\cos \varphi$ електричних установок є важливою техніко-економічною задачею на всіх рівнях підприємств і організацій, що використовують електроенергію. Адже не випадково енергосистема для заохочення промислових підприємств за підвищений $\cos \varphi$ вводять диференційований тариф на оплату за електроенергію, тобто її вартість знижується з підвищенням $\cos \varphi$.

Так, наприклад, в масштабі держави при річному виробленні електроенергії 500 млрд. кВт годин підвищення $\cos \varphi$ на 0,01 дає економію електроенергії 5 млрд. кВт годин.

Приклад 4.15. До трансформатора номінальною потужністю $S_i = 100$ кВА і номінальною напругою 220 В підключена група електродвигунів, загальна потужність яких $P_1 = 60$ кВт, $\cos \varphi_1 = 0,6$ при частоті $f = 50$ Гц (рис. 4.19 а). Якщо паралельно групі двигунів під'єднати батарею конденсаторів, коефіцієнт потужності установки підвищиться, а навантаження трансформатора знизиться. Визначити ємність і потужність батареї конденсаторів і додаткове освітлювальне навантаження, які необхідно приєднати до трансформатора, щоб $\cos \varphi$ установки підвищився до 0,9 при повному навантаженні трансформатора.

Визначити ємність і потужність батареї конденсаторів для підвищення $\cos \varphi$ до того ж значення за відсутністю додаткового активного навантаження.

Розв'язання І.

1. У вихідному режимі трансформатор навантажений до номінальної потужності:

$$S = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} = \frac{60}{0,6} = 100 \text{ кВА} = S_{\text{НОМ.}}$$

2. Додаткове освітлювальне активне навантаження може бути ввімкнено тільки за рахунок розвантаження трансформатора від частини реактивного струму шляхом підвищення коефіцієнта потужності установки.

За умовою задачі, трансформатор після підвищення $\cos \varphi$ залишається повністю завантаженим, отже, при незмінній напрузі струм трансформатора повинен залишатися попереднім: $I_1 = I_2$.

Із векторної діаграми (рис. 4.19, б) випливає вираз для струму конденсатора:

$$I_C = I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2 = I_1 (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)$$

при $\cos \varphi_1 = 0,6$; $\sin \varphi_1 = 0,8$;

при $\cos \varphi_2 = 0,9$; $\sin \varphi_2 = 0,436$.

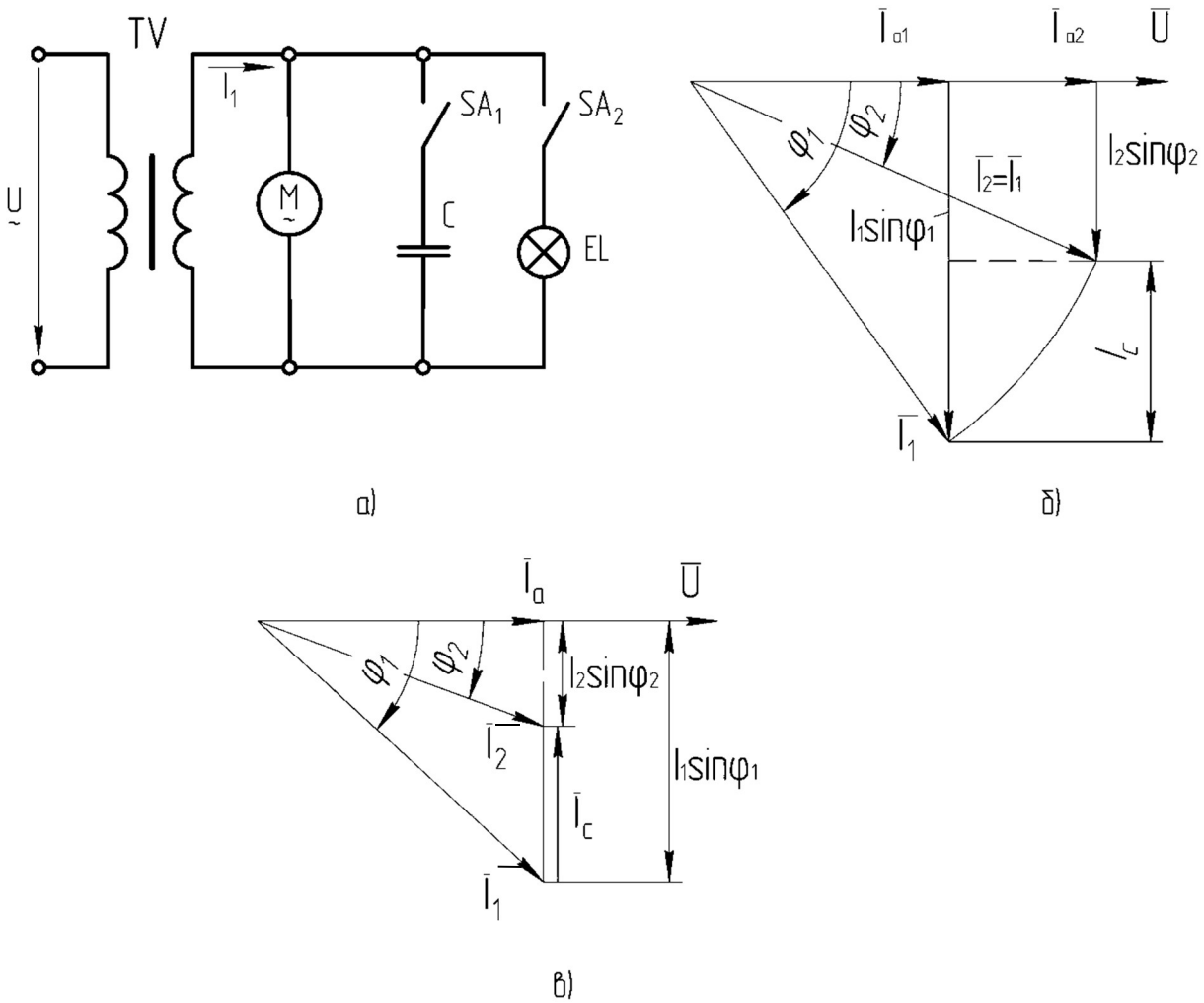


Рис. 4.19 до задачі 4.14:

а) – схема установки; б) – векторна діаграма з додатковим активним навантаженням; в) – векторна діаграма без додаткового активного навантаження

3. Струм установки до підвищення $\cos \varphi$

$$I_1 = \frac{P_1}{U \cos \varphi_1} = \frac{60 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,6} = 454,5 \text{ A}$$

4. Струм в конденсаторі (див. п.2 розрахунку)

$$I_C = 455(0,8 - 0,436) = 165 \text{ А}$$

5. Ємність батареї конденсаторів

$$C = \frac{I_C}{\omega U} = \frac{165 \cdot 10^6}{314 \cdot 220} = 2380 \text{ мкФ}$$

6. Потужність батареї конденсаторів

$$Q_C = U^2 \omega C = 220^2 \cdot 314 \cdot 2380 \cdot 10^{-6} = 36200 \text{ вар} = 36,2 \text{ квар}$$

7. Активний струм додаткового освітлювального навантаження

$$I_0 = I_{a2} - I_{a1} = I_1 \cos \varphi_2 - I_1 \cos \varphi_1 = 455(0,9 - 0,6) = 136 \text{ А.}$$

8. Потужність освітлювального навантаження

$$P_0 = UI_0 = 220 \cdot 136 = 30000 \text{ Вт} = 30 \text{ кВт.}$$

Розв'язання II

за відсутністю додаткового освітлювального навантаження.

9. Необхідний струм в конденсаторі (рис.19,в до задачі 4.14)

$$I_C = I_a \operatorname{tg} \varphi_1 - I_a \operatorname{tg} \varphi_2 = I_a (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2);$$

$$I_C = 272 \left(\frac{0,8}{0,6} - \frac{0,436}{0,9} \right) = 230 \text{ А}$$

де $I_a = I_1 \cos \varphi_1 = 454,5 \cdot 0,6 = 272 \text{ А.}$

10. Ємність батареї конденсаторів

$$C = \frac{I_C}{\omega U} = \frac{230 \cdot 10^6}{314 \cdot 220} = 3330 \text{ мкФ}$$

11. Потужність батареї конденсаторів

$$Q_C = U^2 \omega C = 220^2 \cdot 314 \cdot 3330 \cdot 10^{-6} = 5600 \text{ Вар} = 50,6 \text{ квар.}$$

4.2.4. Символічний метод аналізу і розрахунку кіл змінного синусоїдального струму

4.2.4.1. Основні поняття та визначення

Використання векторних діаграм для аналізу кіл змінного струму, не дивлячись на простоту та наочність, не завжди дає достатню точність при розрахунках. Комплексний або символічний метод поєднує в собі простоту векторних діаграм з можливістю виконувати розрахунки з достатнім для практики ступенем точності. Цей метод дозволяє при різних операціях з електричними величинами враховувати як абсолютне значення цих величин (модулі), так і їх фази (аргументи).

Комплексне зображення векторів має велику перевагу при розрахунках кіл змінного струму. Особливого значення комплексний

метод набуває при розрахунках трифазних кіл з несиметричним навантаженням, які у своєму складі мають активні і реактивні опори. Через це буде доцільним ознайомитися з комплексним методом.

Основу комплексного методу складають представлення векторів на комплексній площині і запису їх комплексними числами.

Комплексні числа складаються, віднімаються, множаться і діляться за правилами, відомими із вищої математики. Це дозволяє для кіл синусоїдального струму використовувати закони Ома і Кірхгофа і впливаючі із них методи розрахунків кіл у тій же формі, що і для кіл постійного струму.

Комплексна площина являє собою прямокутну систему координат, подібну площині декартових координат. Вісь абсцис на комплексній площині є дійсною віссю і позначається (+1); (-1), а вісь ординат – уявною і позначається (+j), (-j), де $j = \sqrt{-1}$. (рис. 4.20), а в електротехніці на відміну від математики уявну одиницю $\sqrt{-1}$ позначають буквою *j* (йот), тому що буква *i* прийнята для позначення миттєвого значення струму).

$j = \sqrt{-1}$ - є символ або оператор повороту вектора на кут $\pi/2 = 90^\circ$. Через це розрахунок синусоїдальних функцій з використанням комплексних чисел називають ще символічним методом. Символічний метод був запропонований в 1893 році видатним американським електротехніком Чарльзом Протеусом Штейнмецем.

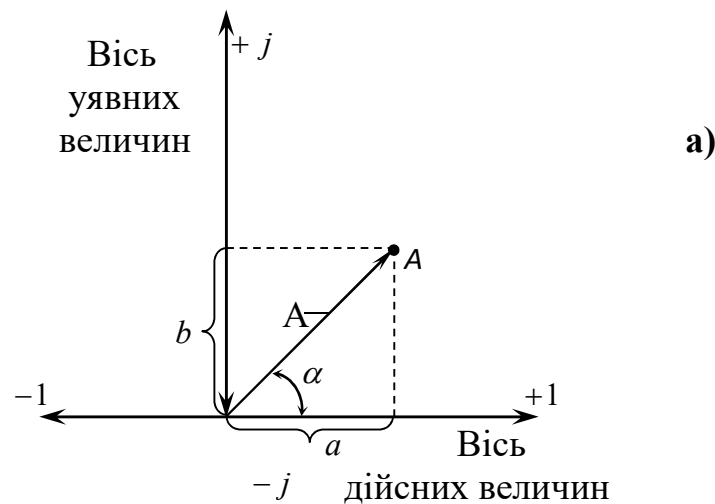


Рис. 4.20. Представлення вектора на комплексній площині:
а) в загальному вигляді; б) за допомогою дійсних чисел.

Як відомо, із курсу алгебри, комплексне число складається із двох доданків:

$$\dot{A} = a + jb. \quad (4.64)$$

Перший доданок a – дійсне число, а другий jb – уявне. Уявне число є добутком дійсного числа b і уявної одиниці j . По дійсній вісі відкладають дійсну частину комплексного числа a , по уявній вісі – уявну частину комплексного числа jb . Комплексну величину, що змінюється за синусоїдальним законом, відмічають точкою наверху (\dot{U} , \dot{E} , \dot{I} , $\dot{\Phi}$ і т.д.), комплекси величин, незалежні від часу підкреслюються знизу (\underline{Z} , \underline{Y} , \underline{y} і т.д.).

Вираз (4.64) є алгебраїчною формою запису комплексного числа. Це число можна зобразити у вигляді вектора на комплексній площині (рис. 4.20,б). Позитивні числа зображаються по відповідним осям вправо і вверх, негативні – вліво і вниз.

Відклавши на осях дійсну і уявну частину комплексного числа, ми можемо на комплексній площині знайти одну єдину точку \dot{A} , що відповідає цьому числу. Відповідність виражається в тому, що проекція на дійсну вісь відрізка A , проведеного із початку координат в точку \dot{A} , дорівнює дійсному числу, а проекція на уявну вісь – дорівнює уявному числу.

Положення точки \dot{A} на комплексній площині можливо також визначати довжиною відрізка A і кутом α , між напрямком цього відрізка і позитивним напрямком дійсної вісі (Рис. 4.20).

Довжина відрізка A у відповідному масштабі визначає абсолютне значення, або модуль комплексного числа:

$$|A| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (4.65)$$

а кут α є його аргументом:

$$\alpha = \arctg \frac{b}{a}, \text{ при } a > 0 \text{ і } \alpha = \arctg \frac{b}{a} + 180^\circ \text{ при } a < 0. \quad (4.66)$$

Будь-якому комплексному числу на комплексній площині відповідає один вектор. Так само кожний вектор на комплексній площині, проведений із початку координат, можна виразити комплексним числом, визначаючи точку, в якій лежить кінець вектора. Це відноситься до будь-якого вектора, оскільки його можна перенести паралельно самому собі і провести із початку координат.

Відповідно рис.4.20. тригонометричний вираз комплексного числа такий:

$$a = A \cos \alpha ; b = A \sin \alpha ; \quad (4.67)$$

$$\dot{A} = a + jb = A \cos \alpha + jA \sin \alpha = A(\cos \alpha + j \sin \alpha).$$

Рівняння (4.67) є тригонометричною формою запису комплексного числа.

Із курсу вищої математики відома формула Ейлера:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha,$$

На основі цього виразу комплексне число можна виразити в показниковій формі запису:

$$\dot{A} = a + jb = A(\cos \alpha + j \sin \alpha) = A \cdot e^{j\alpha}, \quad (4.68)$$

де e – основа натурального логарифму.

За позитивний напрямок обертання вектора на комплексній площині приймають напрямок обертання проти годинникової стрілки. Через це додатний кут α відкладають від півосі дійсних чисел проти руху годинникової стрілки, а від’ємний кут $(-\alpha)$ – за годинниковою стрілкою.

Комплексне число $e^{j\alpha}$ зображується на комплексній площині вектором, який чисельно рівний одиниці і утворює кут α з віссю дійсних величин.

Модуль функції:

$$|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1. \quad (4.69)$$

Якщо замість функції $e^{j\alpha}$ взяти функцію $I_m \cdot e^{j\alpha}$, то отримаємо,

$$I_m \cdot e^{j\alpha} = I_m \cos^2 \alpha + j I_m \sin^2 \alpha.$$

Кут може бути будь-яким, а тому замість α покладемо $\alpha = \omega t + \psi$, отримаємо

$$I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)} = \underbrace{I_m \cos^2(\omega t + \psi)}_{R_e} + \underbrace{j I_m \sin^2(\omega t + \psi)}_{I_m} \quad (4.70)$$

У рівнянні (4.70):

R_e – (від англійського слова *real*) – дійсна (реальна) частина функції $I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)}$, тобто

$$I_m \cos(\omega t + \psi) = R_e I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)}.$$

I_m – (від англійського слова *imaginary*) – уявна частина функції $I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)}$, тобто

$$I_m \sin(\omega t + \psi) = I_m I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)}.$$

Не становить великих труднощів замітити, що $I_m \sin(\omega t + \psi) = i$ – миттєве значення синусоїдального струму, яке може бути зображене проекцією вектора $I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)}$ на уявну вісь j .

Для моменту часу $\omega t = 0$ вектор

$$I_m \cdot e^{j(\omega t + \psi)} = I_m \cdot e^{j\psi} = \dot{I}_m, \quad (4.71)$$

де \dot{I}_m – комплексна величина, модуль якої дорівнює I_m , а ψ – аргумент або кут, під яким вектор I_m проведений із початку координат до дійсної осі $+1$ і котрий визначає початкову фазу.

При різних аргументах ψ для виразу $e^{j\psi}$ справедливі рівності:

$$\left. \begin{aligned} \psi = 0; e^{j0} &= \cos 0 + j \sin 0 = 1; \\ \psi = \pm \frac{\pi}{2}; e^{\pm j\pi/2} &= \cos \frac{\pi}{2} \pm j \sin \frac{\pi}{2} = \pm j; \\ \psi = \pm \pi; e^{\pm j\pi} &= \cos \pi \pm j \sin \pi = -1; \\ \psi = \pm 2\pi; e^{\pm j2\pi} &= \cos 2\pi \pm j \sin 2\pi = +1. \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

Для розрахунків кіл змінного струму велике практичне значення мають такі положення:

$$1. \quad \left. \begin{aligned} e^{\pm j\pi} = e^{j\pi/2} \cdot e^{j\pi/2} &= j \cdot j = j^2 = -1, \\ \text{то } j &= \sqrt{-1}; \\ j^3 = j^2 \cdot j &= -j; j^4 = j^2 \cdot j^2 = +1; \\ j^5 = j^4 \cdot j &= j; j^6 = -1 \text{ і т.д.} \\ \frac{1}{j} = -j; \frac{1}{-j} &= +j; j(-j) = +1 \end{aligned} \right\} \quad (4.73)$$

2. Два комплекси рівні між собою, якщо за окремістю рівні їх дійсні та уявні частини, наприклад, якщо

$$a = c \text{ і } b = d, \text{ то } a + jb = c + jd.$$

3. Для складання комплексів їх дійсні та уявні частини додаються окремо:

$$a + jb + c + jd - \kappa = (a + c - \kappa) + j(b + d).$$

4. Два комплекси називаються спряженими, якщо їх дійсні частини рівні, а уявні мають протилежні знаки, або, що те ж саме, якщо вони мають один і той же модуль, але кути їх повороту рівні й мають протилежні знаки, наприклад,

$$a + jb = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot e^{j\alpha} \text{ і } a - jb = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot e^{-j\alpha}; \arctg \alpha = \frac{b}{a}.$$

Добуток двох спряжених комплексів дорівнює квадрату модуля:

$$(a + jb)(a - jb) = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot e^{j\alpha} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot e^{-j\alpha} = a^2 + b^2 = A^2.$$

5. Добуток двох довільних комплексів

$$a + jb = A_1(\cos \alpha + j \sin \alpha) = A_1 \cdot e^{j\alpha}$$

$$c + jd = A_2(\cos \beta + j \sin \beta) = A_2 \cdot e^{j\beta}$$

дає комплекс

$$\begin{aligned} (a + jb)(c + jd) &= ac - bd + j(bc + ad) = A_1 A_2 e^{j(\alpha + \beta)} = \\ &= \sqrt{(a^2 + b^2)(c^2 + d^2)} [\cos(\alpha + \beta) + j \sin(\alpha + \beta)] \end{aligned}$$

6. Частина від ділення двох комплексів дорівнює комплексу

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \frac{bc - ad}{c^2 + d^2} = \frac{A_1}{A_2} \cdot e^{j(\alpha - \beta)} =$$

$$= \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}} [\cos(\alpha - \beta) + j \sin(\alpha - \beta)].$$

7. Якщо комплекс зображати у вигляді деякого вектора, що займає певне положення в числовій площині, то множення комплексу на множник $e^{j\alpha}$ рівнозначно повороту цього вектора на кут α проти руху стрілки годинника, а ділення вектора на $e^{j\alpha}$ (або помноження на $e^{-j\alpha}$, так як $1/e^{j\alpha} = e^{-j\alpha}$) рівнозначно повороту цього вектора на кут α за рухом стрілки годинника.

4.2.4.2. Вирази основних характеристик електричних кіл синусоїдного струму комплексними числами

Як було відмічено раніше, кожному вектору на комплексній площині відповідає лише одне комплексне число. Це слугує підставою від графічного (векторного) виразу синусоїдальних напруг і струмів перейти до аналітичного виразу їх комплексними числами, а операції з векторами замінити алгебраїчними діями.

Струми і напруги.

Для розрахунків електричних кіл змінного струму зазвичай користуються діючими значеннями напруг і струмів. Ось чому комплекси цих величин записують так, що модулі їх рівні діючим значенням (подібно тому, як на векторних діаграмах довжини векторів виражають діючі значення). Зображення струмів і напруг комплексними числами розглянемо на прикладі паралельного з'єднання котушки і конденсатора (рис. 4.21).

На рис. 4.21,а котушка і конденсатор представлені активними і реактивними опорами, а на рис. 4.21,б – активними і реактивними провідностями. Друга схема має деякі переваги, так як в ній всі елементи з'єднані паралельно, а у першій схемі вони з'єднані мішано.

Рахуючи відомими параметри котушки R_1 , X_L , q_1 і b_L ; конденсатора R_2 , X_C , q_2 і b_C , а також напругу $U = U_m \sin \omega t$, визначимо значення струмів і напруг комплексними числами.

Напруга з початковою фазою ψ_U на затискачах кола виражається рівнянням

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U)$$

Цій напрузі відповідає вектор \dot{U} на комплексній площині та комплексне число

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\psi_U} \quad (4.74)$$

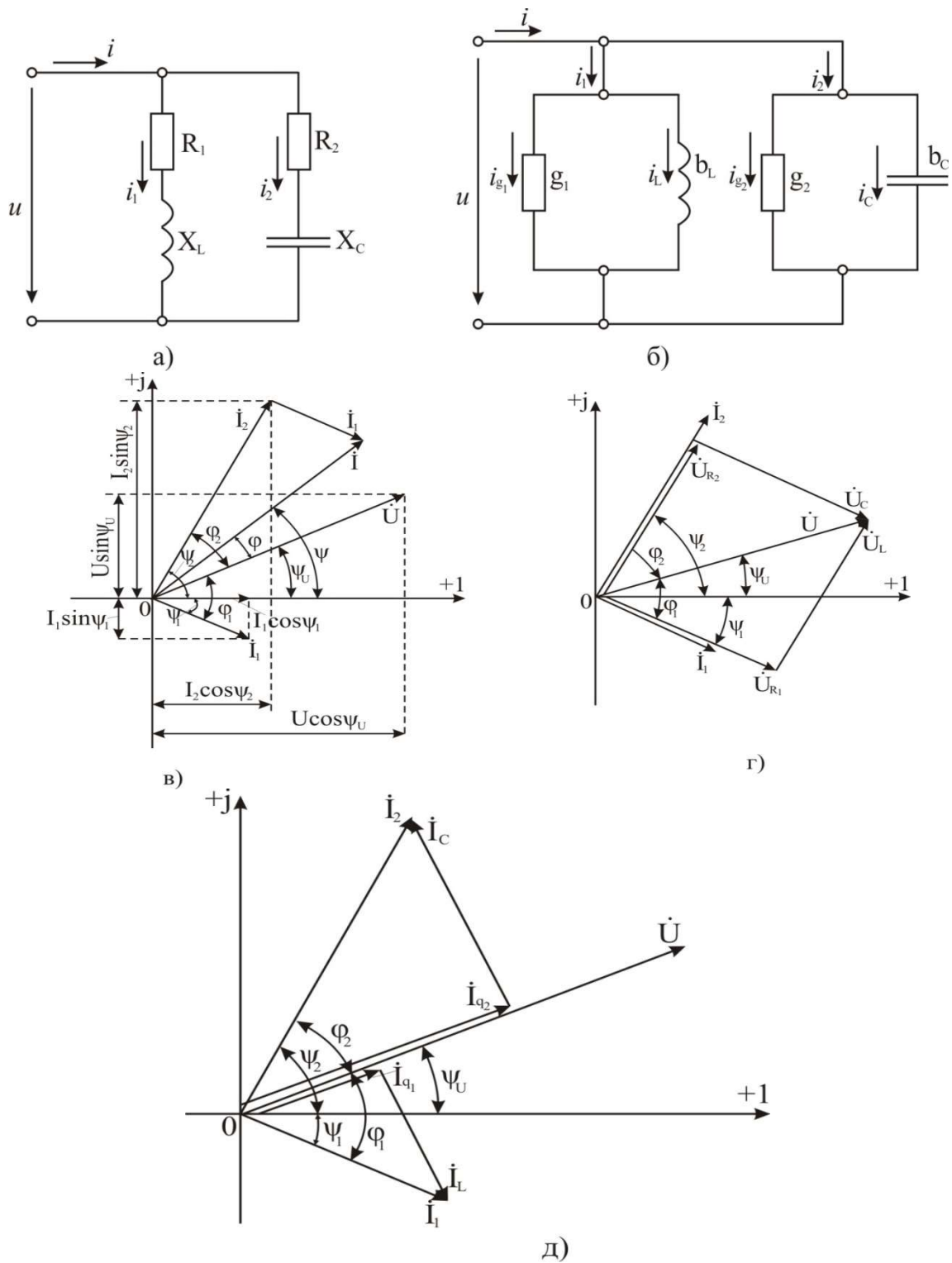


Рис. 4.21. Зображення параметрів електричного кола комплексними числами: а), б) – еквівалентні схеми електричного кола паралельного з'єднання котушки і конденсатора; в) – векторна діаграма струмів (трикутник струмів) у схемі а); г) – векторна діаграма напруг (трикутники напруг обох віток) у схемі а); д) – векторна діаграма струмів (трикутники струмів) у схемі б)

Струм I_1 у котушці відстає від напруги на кут φ_1 і його миттєве значення

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_U - \varphi_1) = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1);$$

кут $\psi_1 = \psi_U - \varphi_1$, як видно із рисунка 4.21,в – від’ємний, тобто початкова фаза струму $I_1 = \psi_1 < 0$.

Вектору струму I_1 відповідає комплексне число

$$\dot{I}_1 = I_1 \cdot e^{-j\psi_1} = I_1 \cos\psi_1 - jI_1 \sin\psi_1. \quad (4.75)$$

Струм у конденсаторі випереджує напругу на кут φ_2 . Вектору струму \dot{I}_2 відповідає рівняння

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_U + \varphi_2) = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2)$$

і комплекс

$$\dot{I}_2 = I_2 \cdot e^{j\psi_2} = I_2 \cos\psi_2 + jI_2 \sin\psi_2, \quad (4.76)$$

де $\psi_2 = \psi_U + \varphi_2$.

За першим законом Кірхгофа, струм у нерозгалуженій частині кола складається із струмів у паралельних вітках:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

Для визначення цього струму складання векторів $\bar{I}_1 + \bar{I}_2$ можна замінити складанням комплексів:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \quad (4.77)$$

$$\dot{I} = (I_1 \cos\psi_1 - jI_1 \sin\psi_1) + (I_2 \cos\psi_2 + jI_2 \sin\psi_2) = I \cos\psi + jI \sin\psi = I \cdot e^{j\psi}. \quad (4.78)$$

Слід звернути увагу на різницю між діючою і уявною частинами комплексу, з однієї сторони, і активною або реактивною складовою вектору струму, з другої сторони.

Дійсна і уявна частини комплексу дорівнюють проєкціям вектора струму на вісі комплексної площини (вісь дійсних і вісь уявних величин).

Активна і реактивна складові вектора струму на даній ділянці кола дорівнюють його проєкціям на взаємно перпендикулярні вісі, одна із яких має напрямок вздовж вектора напруги цієї ж ділянки кола (дійсна і уявна частини комплексу струму дорівнюють відповідно активній і реактивній складовим вектора струму тільки в тому випадку, якщо вектор напруги має напрямок вздовж вісі дійсних чисел, тобто комплекс напруги виражається дійсним числом).

Опори і провідності

Для виразу опорів в комплексній формі розглянемо ще раз (рис. 4.21,а). На схемі кожний із елементів (котушка і конденсатор) зображений активним і реактивним опорами, з’єднаними послідовно, а на

рис. 4.21,г – векторна діаграма, що відповідає цій схемі (трикутники напруг обох віток).

Вектор загальної напруги \bar{U} дорівнює сумі його активної і реактивної складових:

$$\left. \begin{array}{l} \text{в першій вітці (котушка)} \bar{U} = \bar{U}_{R_1} + \bar{U}_L; \\ \text{в другій вітці (конденсатор)} \bar{U} = \bar{U}_{R_2} + \bar{U}_C \end{array} \right\} \quad (4.79)$$

Спад напруги на активному опорі по фазі збігається зі струмом, через це для визначення вектора U_{R_1} необхідно довжину вектора струму I_1 збільшити в R_1 разів, залишивши той же напрямок, що в комплексній формі відповідає множенню комплексу струму \dot{I}_1 на опір R_1 і поворотний множник $e^{j0^\circ} = 1$:

$$\dot{U}_{R_1} = \dot{I}_1 R_1 e^{j0^\circ} = \dot{I}_1 R_1.$$

Аналогічно для другої вітки

$$\dot{U}_{R_2} = \dot{I}_2 R_2 e^{j0^\circ} = \dot{I}_2 R_2.$$

Звідси випливає, що активний опір в комплексній формі виражається дійсним додатнім числом:

$$R = R \cdot e^{j0^\circ} = R. \quad (4.80)$$

Спад напруги на індуктивному опорі випереджує струм на 90° , а через це для визначення вектора U_L необхідно довжину вектора \dot{I}_1 збільшити в X_L разів і повернути його в протилежному напрямку на 90° , що в комплексній формі відповідає множенню комплексу струму \dot{I}_1 на опір X_L і поворотний множник $e^{j90^\circ} = j$:

$$\dot{U}_L = \dot{I}_1 X_L e^{j90^\circ} = \dot{I}_1 j X_L. \quad (4.81)$$

Спад напруги на ємності відстає від струму на 90° , через це для визначення вектора U_C необхідно довжину вектора \dot{I}_2 збільшити в X_C разів і повернути його в від'ємному напрямку на 90° , що в комплексній формі відповідає множенню комплексу струму \dot{I}_2 на опір X_C і поворотний множник $e^{-j90^\circ} = -j$:

$$\dot{U}_C = \dot{I}_2 X_C e^{-j90^\circ} = -\dot{I}_2 j X_C. \quad (4.82)$$

Отже, реактивні опори в комплексній формі визначаються уявними числами, причому індуктивний опір позитивний, а ємнісний опір негативний:

$$\left. \begin{aligned} X_L &= X_L e^{j90^\circ} = jX_L \\ X_C &= X_C e^{-j90^\circ} = -jX_C \end{aligned} \right\} \quad (4.83)$$

Повні спади напруг у вітках, що дорівнюють у нашому випадку напрузі на затискачах кола, знайдемо на основі рівнянь (4.79), якщо в них замінимо вектори відповідними комплексними:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_{R_1} + \dot{U}_L = \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 jX_L = \dot{I}_1 (R_1 + jX_L) = \dot{I}_1 z_1; \\ \dot{U} &= \dot{U}_{R_2} + \dot{U}_C = \dot{I}_2 R_2 - \dot{I}_2 jX_C = \dot{I}_2 (R_2 - jX_C) = \dot{I}_2 z_2. \end{aligned}$$

Комплекс повного опору першої вітки (котушки)

$$z_1 = R_1 + jX_L = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_1} = \frac{U \cdot e^{j\psi_U}}{I_1 e^{-j\psi_1}} = z \cdot e^{j\varphi_1}. \quad (4.84)$$

Комплекс повного опору другої вітки (конденсатора)

$$z_2 = R_2 - jX_C = \frac{\dot{U}}{\dot{I}_2} = \frac{U \cdot e^{j\psi_U}}{I_2 \cdot e^{j\psi_2}} = z \cdot e^{-j\varphi_2}. \quad (4.85)$$

Таким чином, модуль повного опору ділянки кола з послідовним з'єднанням елементів дорівнює відношенню модулів напруги і струмів цієї ділянки:

$$z = \frac{U}{I}.$$

Фазовий кут дорівнює різниці початкових фаз напруги і струму:

$$\varphi = \psi_U - \psi_i.$$

Повний опір ділянки кола в комплексній формі виражається комплексним числом, дійсна частина якого дорівнює активному опору, уявна частина дорівнює реактивному опору цієї ділянки.

Вирази провідностей віток в комплексній формі можна одержати якщо подати кожний елемент (котушку і конденсатор) схемою паралельного з'єднання активної і реактивної провідностей (Рис. 4.21,б).

Всі попередні міркування, що відносяться до трикутників напруг і опорів, можна застосувати до трикутників струмів і провідностей (Рис. 4.21,д).

Повні провідності віток у комплексній формі можна знайти як величини, зворотні комплексам повних опорів:

$$Y = \frac{1}{Z}.$$

Для першої вітки (котушки)

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \frac{1}{z_1} = \frac{1}{R_1 + jX_L} = \frac{R_1 - jX_L}{(R_1 + jX_L)(R_1 - jX_L)} = \\
 &= \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} - j \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = g_1 - jb_L; \\
 Y_1 &= g_1 - jb_L = \frac{\dot{I}_1}{U} = \frac{I_1 \cdot e^{-j\varphi_1}}{U \cdot e^{j\psi_U}} = y_1 \cdot e^{-j\varphi_1} \quad Y_1 = g_1 - jb_L = \frac{\dot{I}_1}{U} = \frac{I}{U}, \quad (4.86)
 \end{aligned}$$

де $g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2}$ – активна провідність;

$b_L = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2}$ – індуктивна провідність.

Для другої вітки (конденсатора)

$$\begin{aligned}
 Y_2 &= \frac{1}{z_2} = \frac{1}{R_2 - jX_C} = \frac{R_2 + jX_C}{(R_2 - jX_C)(R_2 + jX_C)} = \\
 &= \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2} + j \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} = g_2 + jb_C; \\
 Y_2 &= g_2 + jb_C = \frac{\dot{I}_2}{U} = \frac{I_2 \cdot e^{j\varphi_2}}{U \cdot e^{j\psi_U}} = y_2 \cdot e^{j\varphi_2} \quad (4.87)
 \end{aligned}$$

$$Y_1 = g_1 - jb_L = \frac{\dot{I}_1}{U} = \frac{I_1 \cdot e^{-j\varphi_1}}{U \cdot e^{j\psi_U}} = y_1 \cdot e^{-j\varphi_1},$$

де $g_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2}$ – активна провідність;

$b_C = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}$ – ємнісна провідність.

Результати цих перетворень показують, що повна провідність вітки електричного кола в комплексній формі виражається комплексним числом, дійсна частина якого дорівнює активній провідності, а уявна частина дорівнює реактивній провідності цієї вітки, причому індуктивна провідність від'ємна, а ємнісна – додатна.

Потужність

Комплекс потужності у даному колі визначається множенням комплексу напруги на спряжений комплекс струму цього кола.

Для вітки з активним опором і індуктивністю (рис.4.21,а), згідно з векторною діаграмою (рис.4.21,в).

$$\dot{U} * e^{j\psi_U} * I_1 = I_1 * e^{-j\psi_1} .$$

Добуток комплексу напруги і спряженого комплексу струму

$$\tilde{S}_1 = \dot{U} I_1 = U \cdot e^{j\psi_U} \cdot I_1 \cdot e^{j\psi_1} = UI_1 \cdot e^{j(\psi_U + \psi_1)} = UI_1 \cdot e^{j\varphi_1} .$$

В алгебраїчній формі

$$\tilde{S}_1 = \dot{U} I_1 = UI_1 \cos \varphi_1 + jUI_1 \sin \varphi_1 = P_1 + jQ_L . \quad (4.88)$$

Дійсна частина одержаного комплексу виражає активну потужність, а уявна частина без множника j – реактивну потужність першої вітки.

Для вітки з активним опором і ємністю

$$U = U \cdot e^{j\psi_U} ; \dot{I}_2 = I_2 \cdot e^{j\psi_2}$$

$$\tilde{S}_2 = \dot{U} I_2 = U \cdot e^{j\psi_U} \cdot I_2 \cdot e^{-j\psi_2} = UI_2 \cdot e^{j(\psi_U - \psi_2)} = UI_2 \cdot e^{-j\varphi_2} .$$

В алгебраїчній формі

$$\tilde{S}_2 = \dot{U} I_2 = UI_2 \cos \varphi_2 - jUI_2 \sin \varphi_2 = P_2 - jQ_C . \quad (4.89)$$

Реактивна потужність в колі з ємністю має від'ємний знак на відміну від реактивної потужності в колі з індуктивністю, яка додатна. Модуль комплексу потужності в тій і другій вітці дорівнює повній потужності:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= UI_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_L^2} ; \\ S_2 &= UI_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_C^2} \end{aligned} \right\} . \quad (4.90)$$

4.2.4.3. Використання комплексних чисел для розрахунку електричних кіл синусоїдного струму

Подання векторів напруг і струмів комплексами, вирази опорів і провідностей комплексними числами, а також заміна операцій з векторами алгебраїчними діями з комплексними числами дозволяють значно спростити розрахунок складних кіл змінного струму. Окрім того, використання комплексних чисел забезпечує єдність методів розрахунку електричних кіл постійного і змінного струмів. Це означає, що всі методи розрахунку і співвідношення для кіл постійного струму, які впливають з них, можна використовувати і для кіл змінного струму, якщо величини подані в комплексній формі. В цьому полягає практичне значення комплексних чисел для розв'язання задач електротехніки.

Приклад 4.16. Дані два комплексних числа: $A_1 = 30 \cdot e^{j30^\circ}$ і $A_2 = 40 \cdot e^{-j60^\circ}$.

Визначити суму і різницю цих чисел, множення і частку від ділення першого числа на друге.

Розв'язання:

1. Складати і віднімати комплексні числа найбільш зручно в алгебраїчній формі. Через це комплексні числа, що задані в показниковій формі, виразимо через алгебраїчну форму:

$$\dot{A}_1 = 30(\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) = 30 \frac{\sqrt{3}}{2} + j30 \cdot \frac{1}{2} = 26 + j15;$$

$$\dot{A}_2 = 40(\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ) = 40 \frac{1}{2} - j40 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 20 - j34,6;$$

$$\dot{A}_3 = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 = 26 + j15 + 20 - j34,6 = 46 - j19,6$$

2. Виразимо комплексне число A_3 в показниковій формі. Для цього необхідно визначити модуль і аргумент:

$$|A_3| = \sqrt{a_3^2 + b_3^2} = \sqrt{46^2 + 19,6^2} = 50;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b_3}{a_3} = \frac{-19,6}{46} = -0,426; \quad \alpha = -23^\circ;$$

$$\dot{A}_3 = 50 \cdot e^{-j23^\circ}$$

$$3. \dot{A}_4 = \dot{A}_1 - \dot{A}_2 = 26 + j15 - 20 + j34,6 = 6 + j49,6$$

В показниковій формі

$$\dot{A}_4 = 50 \cdot e^{j83^\circ}.$$

4. Множення і ділення комплексних чисел виконаємо в показниковій формі, а результат виразимо в алгебраїчній формі:

$$\dot{A}_5 = \dot{A}_1 \cdot \dot{A}_2 = 30 \cdot e^{j30^\circ} \cdot 40 \cdot e^{-j60^\circ} = 1200 \cdot e^{-j30^\circ};$$

;

$$\dot{A}_6 = \frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} = \frac{30 \cdot e^{j30^\circ}}{40 \cdot e^{-j60^\circ}} = 0,75 \cdot e^{j90^\circ};$$

$$\dot{A}_6 = 0,75 \cos 90^\circ + j0,75 \sin 90^\circ = j0,75.$$

Приклад 4.17. Припустимо, що необхідно визначити струм у вітці, що включена на напругу $U = 179 \sin \omega t$ В, якщо активний опір вітки $R = 4$ Ом, а індуктивний $X_L = 3$ Ом.

Розв'язання:

1. Зобразимо напругу у вигляді, коли її початкова фаза дорівнює нулю, $\psi_U = 0$:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\psi_U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi_U} = \frac{179}{\sqrt{2}} \cdot e^{j0} = 127 \text{ В},$$

а в алгебраїчній формі

$$\square \\ U = 127 + 0 = 127 \text{ В.}$$

2. Загальний опір Z буде

$$Z = R + jX_L = 4 + j3 \text{ Ом,}$$

а в показниковій формі

$$Z = z \cdot e^{j37^\circ} = 5 \cdot e^{j37^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\text{де } z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5, \text{ а } \varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{3}{4} = 37^\circ.$$

3. Комплексний струм отримаємо

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{127 \cdot e^{j0}}{5 \cdot e^{j37^\circ}} = 25,4 \cdot e^{-j37^\circ} \text{ А,}$$

Діюче значення струму $I = 25,4 \text{ А.}$

4. Миттєве значення струму

$$i = 25,4 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - 37^\circ) = 36 \sin(\omega t - 37^\circ) \text{ А,}$$

Таким чином, струм має амплітуду 36 А і відстає за фазою від напруги на 37° (що відповідає $\cos \varphi = 0,8$) і $\sin \varphi = 0,6$; при цьому

$$\text{tg } \varphi = \frac{X}{R} = \frac{3}{4} = 0,75.$$

Приклад 4.18. Визначити комплексний опір навантаження для електричного кола, що складається із активного опору $R = 4 \text{ Ом}$, індуктивності $L = 0,0255 \text{ Гн}$ і ємності $C = 637 \text{ мкФ}$.

Розв'язання:

1. Визначаємо опори X_L і X_C

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 0,0255 = 8 \text{ Ом,}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 637} = 5 \text{ Ом}$$

2. Модуль комплексного опору кола

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{4^2 + (8 - 5)^2} = 5 \text{ Ом,}$$

3. На рисунку до задачі 4.17 зображений на комплексній площині трикутник опорів. Один катет дорівнює активному опорі $R = 4 \text{ Ом}$, відкладений в напрямку дійсної вісі, другий – рівний різниці індуктивного і ємнісного опорів, в напрямку уявної вісі.

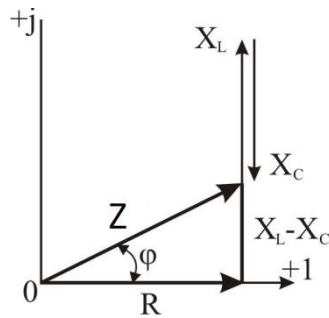


Рис. до задачі 4.17

4. Комплексний опір кола в алгебраїчній формі запишеться так:

$$Z = R + j(X_L - X_C) = 4 + j(8 - 5) = (4 + j3) \text{ Ом.}$$

5. Для запису комплексного опору кола Z в тригонометричній і показникових формах, знайдемо кут φ із трикутника опорів:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{8 - 5}{4} = \frac{3}{4}; \quad \varphi = 36^\circ 50' \approx 37^\circ.$$

Тоді $Z = z \cos \varphi + jz \sin \varphi = (5 \cos 37^\circ + j \sin 37^\circ) \text{ Ом};$

$$Z = z \cdot e^{j\varphi} = 5 \cdot e^{j37^\circ} \text{ Ом.}$$

Приклад 4.19. До електричного кола, що складається із послідовного з'єднання активного опору $R = 3 \text{ Ом}$ і індуктивного $X_L = 4 \text{ Ом}$, підведена синусоїдальна напруга $U = 100 \text{ В}$, з частотою $f = 50 \text{ Гц}$.

Визначити діючі значення напруги і струму в колі. Побудувати відповідні вектори на комплексній площині, знайти повну активну і реактивну потужність.

Розв'язання:

1. Комплексне діюче значення струму:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{U}{(R + jX)} = \frac{100}{(3 + j4)} = \frac{100(3 - j4)}{3^2 + 4^2} = (12 - j16) \text{ А,}$$

2. Діюче значення струму.

$$|\dot{I}| = I = \sqrt{12^2 + 16^2} = 20 \text{ А,}$$

3. Комплексні діючі значення складових діючого значення загальної напруги.

$$\dot{U}_R = R \dot{I} = 3(12 - j16) = (36 - j48) = 60 \cdot e^{j53^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_L = jX_L \dot{I} = j4(12 - j16) = (64 + j48) = 80 \cdot e^{j37^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = 36 - j48 + 64 + j48 = 100 \text{ В.}$$

Те, що діюче значення напруги дорівнює заданій напрузі – підтвердження правильності розв'язання.

4. Комплексна повна потужність всього кола

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I} = 100(12 + j16) = 1200 + j1600,$$

де \dot{I} – спряжений комплексний струм \dot{I} .

5. Активна і реактивна потужності всього кола.

$$P = 1200 \text{ Вт}, \quad Q_L = 1600 \text{ Вар}.$$

6. Повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2} = \sqrt{1200^2 + 1600^2} = 2000 \text{ ВА},$$

$$\text{або } S = UI = 100 \cdot 20 = 2000 \text{ ВА}.$$

Знак плюс в уявній частині потужності свідчить про те, що електричне коло має індуктивний характер, через це реактивна потужність Q позначена з індексом L .

Величини, знайдені аналітично, можна визначити із векторної діаграми.

Векторну діаграму будуюмо в масштабі:

$$m_U = 2 \text{ В/мм}; \quad m_I = 1 \text{ А/мм}.$$

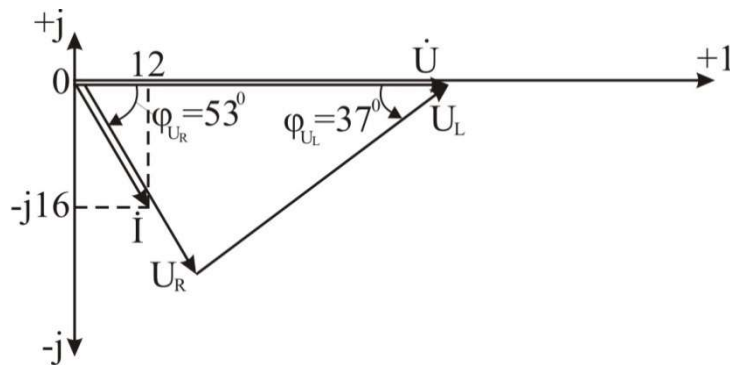


Рис. до задачі 4.18

Довжини відрізків:

$$l_{U_R} = \frac{60}{2} = 30 \text{ мм}$$

$$l_{U_L} = \frac{80}{2} = 40 \text{ мм}$$

$$l_U = \frac{100}{2} = 50 \text{ мм}$$

$$l_{\dot{I}} = \frac{20}{1} = 20 \text{ мм}$$

$$\varphi_{U_R} = 53^\circ$$

$$\varphi_{U_L} = 37^\circ$$

Комплексне діюче значення напруги \dot{U} відкладаємо в напрямку, що збігається з напрямком дійсної осі. На дійсній і уявних осях відключаємо у вибраному масштабі струму відрізки, відповідно дійсній і уявній частині комплексного діючого значення струму. З'єднавши точку, одержану на комплексній площині при побудові комплексного числа $12-j16$, з початком координат одержимо вектор струму \dot{I} . Аналогічно, за складовими комплексних чисел, будуємо вектори напруг \dot{U}_R і \dot{U}_L . В результаті отримаємо прямокутний трикутник, у якого гіпотенуза у відповідному масштабі буде дорівнювати відрізку, довжина якого буде відповідати заданій напрузі.

4.3. Трифазні кола синусоїдного струму

4.3.1. Історичні передумови до розробки та запровадження трифазних кіл

Розробка трифазних кіл так само, як і багатьох інших важливих науково-технічних проблем, була історично обумовлена. Необхідність в їх розробці була викликана вимогами промислового виробництва, яке бурхливо розвивалось, а можливість розв'язання цієї проблеми була обумовлена досягненнями в області вивчення електричних і магнітних явищ і досвідом практичного використання різноманітних електротехнічних пристроїв.

На початку 70-х років 19 століття, коли був створений економічний генератор постійного струму і почалося масове використання електричної енергії для цілей освітлення (свічка Яблочкова та інші), виникла проблема централізованого виробництва і розподілу енергії (електрична енергія стала товаром!). Перші електростанції виробляли постійний струм, вони являли собою електрогенератор, що приєднувався до парової машини чи турбіни, і призначався для постачання електроенергії окремим об'єктам (наприклад, фабрики, цеху, майстерні, окремій споруді чи будівлі, в крайньому випадку – кварталу).

У середині 80-х років стали будуватися центральні міські електростанції, що виробляли струм перш за все для освітлення (перша така електростанція була побудована в 1882 році в Нью-Йорку під керівництвом Едісона, перша в Україні велика електростанція однофазного струму була побудована в 1882 році для освітлення знаменитого Одеського оперного театру).

Струм на них вироблявся потужними паровими машинами, але вже на початку 90-х років стало зрозуміло, що таким чином енергетичну проблему не розв'язати, оскільки потужність центральних станцій,

розташованих в центральній частині міста не могла бути занадто великою, та й вимагала великої кількості палива (в основному вугілля і нафти), доставка якого коштувала досить дорого.

Практичніше і дешевше було споруджувати електростанції в місцевості з дешевими паливними і гідроресурсами. Але, як правило, місцевості, де можна було в великій кількості одержувати дешеву електроенергію, були віддалені від промислових центрів і великих міст на десятки і сотні кілометрів. Таким чином, виникла проблема передачі електроенергії на великі відстані.

Перші спроби в цій галузі відносяться до самого початку 70-х років 19 століття, коли користувались виключно постійним струмом. Вони показали, що як тільки довжина з'єднувального провoda між генератором і споживачем перевищувала декілька сотень метрів, відчувалось значне зниження потужності споживача через великі втрати енергії в провodaх (кабелях). Це явище легко зрозуміти, якщо згадати про теплову дію струму. Проходячи по провodaх, струм нагріває їх. Ці втрати на нагрівання тим більші, чим більший опір провoda і сила протікаючого по ньому струму. (Кількість теплоти, що виділяється легко розрахувати за законом Джоуля-Ленца $Q = I^2 \cdot R \cdot t$, де I – сила протікаючого струму, R – опір провoda. Очевидно, що опір провoda тим більший, чим більша їх довжина і чим менший їх переріз. Якщо у цій формулі прийняти $I = P/U$, де P – потужність навантаження, а U – напруга струму, то формула прийме вираз:

$$Q = \frac{P^2 R}{U^2}. \quad (4.91)$$

Із формули (4.62) видно, що втрати на тепло будуть тим менші, чим більше напруга мережі. Існувало тільки два способи для зниження втрат в лінії електропередачі; або збільшенням перерізу передавального провoda, або збільшенням напруги мережі живлення. Проте збільшення перерізу провoda викликало подорожчання його, тому що на той час використовувались провідники із досить дорогої міді. Другий спосіб був більш привабливим і в технічному і економічному відношеннях.

У 1882 році під керівництвом відомого французького електротехніка Депре була побудована перша лінія електропередач постійного струму від Місбах до Мюнхена на відстані 57 км. Енергія від генератора передавалася на електродвигун, що приводив в дію насос. При цьому втрати в провodaх досягали 75%. В 1885 році Депре здійснив ще один дослід, здійснивши електропередачу між Крейлем і Парижем на відстані 56 км. При цьому була використана напруга в 6 тисяч вольт. Втрати знизилися до 55%. Було очевидно, що шляхом підвищення напруги можна значно підвищити ККД лінії, але для цього необхідно було будувати генератори постійного струму високої напруги, що на той час було пов'язано з великими труднощами. З другого боку, струм високої

напруги неможливо було використати, оскільки на практиці (і, перш за все, для потреб освітлення) потрібна була зовсім невелика напруга, порядку 100 вольт. Для того, щоб знизити напругу постійного струму, необхідно було будувати складну перетворюючу систему: струм високої напруги приводив у дію двигун, а той, в свою чергу, обертав генератор, що давав струм низької напруги. При цьому втрати ще більше зростали, і сама ідея передачі електроенергії ставала економічно не вигідною.

Природною була спроба використати змінний однофазний струм, який, як відомо, легко трансформувався (уже були створені прості трансформатори).

Але виникло друге протиріччя: однофазні двигуни змінного струму не мають початкового пускового моменту і через це не задовольняли вимоги промислового електропривода. Через це використання однофазного струму в 70-80 роках було обмежене лише використанням для електричного освітлення.

Таким чином, проблема централізованого виробництва і розподілу електроенергії переросла в комплексну – необхідно було одночасно розв'язати дві дуже складні науково-технічні задачі: економічність передачі енергії на далекі відстані та створення надійного електродвигуна, який задовольняв би вимоги промислового електропривода.

Це рішення було знайдено на основі багатофазних систем – двофазна Тесла і трифазна Доліво-Добровольського.

Нікола Тесла розробив ряд конструкцій, переважно двофазних, генераторів, електродвигунів і трансформаторів, а також схеми передачі та розподілу багатофазних струмів.



Тесла Нікола (1856-1943р.р.) – видатний сербський учений в галузі електротехніки і радіотехніки. Відкрив у 1888 р. (незалежно від Г. Ферраріса) явища обертового магнітного поля і створив перший двофазний асинхронний двигун, який знайшов практичне використання. Відомий за дослідженнями струмів високих напруг і частот, Н. Тесла належить декілька сот винаходів в області електротехніки (електричні двигуни, генератори, трансформатори струмів високої частоти (від 5000 до 20000 Гц). Винайшов електричний лічильник, частотомір та інші прилади. Досліджував можливість бездротяної передачі сигналів і енергії на значні відстані, й у 1899 році демонстрував лампи і двигуни, що працювали без проводів на високочастотних струмах. Сконструював ряд радіокерованих самохідних механізмів.

Найбільш раціональною виявилась трифазна система Доліво-Добровольського, яка мала ряд переваг перед, як однофазними колами змінного струму, так і перед іншими багатофазними системами.

У розробку трифазних систем великий внесок зробили вчені та інженери різних країн. Н.Тесла – серб, М. О. Доліво-Добровольський – росіянин, Ф. Хозельвандер – німець, М. Депре – француз, Ч. Бредлі – американець.

Найбільша заслуга серед них належить видатному електротехніку М. Й. Доліво-Добровольському, який зумів надати своїм роботам практичний характер і створив трифазні двигуни, трансформатори, трифазні вимірювальні прилади, розробив трипровідну і чотирипровідну системи електропостачань, розподілу та споживання електроенергії.

Доліво-Добровольський виключений в 1881 році з політичних мотивів зі Ризького політехнічного інституту, він виїхав у Німеччину. Тут він закінчив Дармштатське вище технічне училище і з 1887 року почав працювати у великій німецькій електротехнічній фірмі АЄГ (яка існує і до сьогодні). Там він проявив себе як талановитий інженер і винахідник.



Доліво-Добровольський Михайло

Йосипович – видатний електротехнік. Винайшов трифазний асинхронний двигун, трифазний трансформатор, фазометр та інші вимірювальні прилади трифазних мереж, розробив схеми вмикання генераторів і двигунів «зіркою» і «трикутником». Вперше здійснив далеку (170 км) передачу електроенергії трифазною системою струмів.

На той час, як уже відмічалось, були розроблені дві системи багатофазних струмів-двофазна Тесли і трифазна Доліво-Добровольського.

Кожна з них претендувала на домінуюче положення в електротехніці. По якому ж шляху повинна була піти електрифікація? Точної відповіді на це питання спочатку ніхто не знав. У всіх країнах йшли жваві обговорювання переваг і недоліків кожної із цих систем струмів.

Остаточне це питання було з'ясовано на франкфуртській виставці у 1891 році.

У кінці 80-х років постало питання про спорудження центральної електростанції в місті Франкфурт-на-Майні. Багато німецьких та іноземних фірм пропонували міській владі різні варіанти проектів, що передбачали використання або постійного, або ж змінного струму. Для з'ясування суперечливого питання і було вирішено провести у Франкфурті міжнародну електротехнічну виставку. Її головною метою повинна була стати демонстрація передачі і розподілу енергії в різних системах і застосуваннях. Будь-яка фірма мала можливість демонструвати на цій

виставці свої досягнення, а міжнародна комісія з найбільш авторитетних вчених повинна була дати відповідь на питання про вибір роду струму.

Фірмі АЄГ було запропоновано здійснити передачу електроенергії від містечка Лауфен до Франкфурта на відстані 170 км. На той час це була величезна відстань і багато хто вважав саму ідею фантастичною.

Проте Доліво-Добровольський був настільки впевнений в системі і можливостях трифазного струму, що переконав керівництво фірми дати згоду на експеримент.

За короткий проміжок часу (за півроку) було спроектовано і побудовано трифазний генератор небувалий по потужності асинхронний двигун в 100 кінських сил, трансформатори і лінія електропередачі підвішена на 3182 дерев'яних опорах висотою 8 і 10 м із середнім прогином 60 м передбачалось вести електропередачу напругою 15 тисяч вольт. У Франкфурті провона підходили до понижувальних трансформаторів (вони були розташовані в спеціальному павільйоні), які понижували напругу на виході до 116 вольт. До одного з цих трансформаторів було підключено 1000 лампочок розжарювання по 16 свічок (55 ват) кожна, до другого – великий трифазний двигун Доліво-Добровольського, що був розташований в іншому павільйоні.

25 серпня 1891 року в 12 годин дня на виставці вперше спалахнуло 1000 електричних лампочок, що жились струмом Лауфенської гідроелектростанції, яка була розташована на відстані 170 км. Ці лампочки обрамляли щити і арку над входом в ту частину виставки, експонати якої відносились до електропередачі Лауфен-Франкфурт. Наступного дня був успішно випробуваний двигун потужністю 75 кіловат, який 12 вересня вперше привів в дію десятиметровий водоспад. Не дивлячись на те, що лінія, машини, трансформатори, розподільчі щити і інше обладнання виготовлялись поспішно, вся установка, включена без попереднього випробування, на подив одних і на радість інших, відразу стала добре працювати.

У жовтні міжнародна комісія розпочала дослідження Лауфен-Франкфуртської лінії електропередачі. Було встановлено що втрати при електропередачі склали всього 25 %, що виявилось дуже хорошим результатом. У листопаді лінія була випробувана при напрузі в 25 тисяч вольт. При цьому ККД збільшився, а втрати знизилися до 21 %. Переважна більшість електриків всіх країн світу (виставку відвідало більше мільйона людей) гідно оцінили значення Лауфен-Франкфуртського експерименту. Трифазний струм одержав дуже високу оцінку, і йому з цього часу був відкритий широкий шлях до промисловості. Доліво-Добровольського відразу стали вважати одним із провідних електротехніків планети, і його ім'я одержало світову популярність.

Так була розв'язана головна енергетична проблема кінця 19 століття – проблема централізації виробництва електроенергії та її передачі на великі відстані. В 20 столітті трифазна система закріпилась повсюди, у всіх країнах світу.

4.3.2. Основні визначення та одержання трифазної системи ЕРС

Трифазні електричні кола являють собою частковий випадок багатофазних кіл. Багатофазна система електричних кіл є сукупність декількох однофазних електричних кіл, в кожному із яких діють синусоїдні ЕРС однієї і тої ж частоти, створені загальним джерелом енергії та зсунуті одна відносно іншої за фазою на один і той же кут. Слід відмітити, що кожне із однофазних кіл називається фазою трифазної системи (оскільки під терміном «фаза» в електротехніці розуміють ще й аргумент синусоїдної функції, то ці два терміни слід розрізняти за змістом).

Трифазні кола – це сукупність трьох однофазних кіл, в яких діють синусоїдні ЕРС однієї і тієї ж частоти, зсунуті по фазі одна відносно іншої на кут $2\pi/3$, або $1/3$ періоду.

Джерелом електричної енергії в трифазному колі є синхронний генератор, в трьох обмотках якого, конструктивно зсунутих одна відносно іншої на кут $2\pi/3$, які називаються фазами, індукуються три змінні ЕРС, фази яких, в свою чергу, також зсунуті одна відносно одної на кут $2\pi/3$.

Будова найпростішого трифазного синхронного генератора схематично показана на рис. 4.22.

В пазах осердя статора розташовані три однакові обмотки. Для простоти будемо рахувати, що кожна із обмоток складається тільки з одного витка, тобто із двох проводів, закладених в діаметрально протилежних пазах статора. Ці два проводи кожною із обмоток на задньому торці статора з'єднані одна з одною (показано пунктиром). На передньому торці статора витки обмоток закінчуються затискачами А,В,С (початок обмоток) і відповідно затискачами Х,У,З (кінці обмоток). Початки обмоток зсунуті відносно один одного на кут $2\pi/3$, і відповідно їх кінці також зсунуті відносно один одного на кут $2\pi/3$. ЕРС в обмотках статора індукуються в результаті перетинання їх витків магнітним полем, яке збуджується постійним струмом, що проходить по обмотці ротора, який обертається. Ця обмотка називається обмоткою збудження. При рівномірній частоті обертання ротора в обмотках статора індукуються синусоїдні ЕРС однакової частоти, зсунуті по фазі відносно одна одної на кут $2\pi/3$. Така система ЕРС називається симетричною.

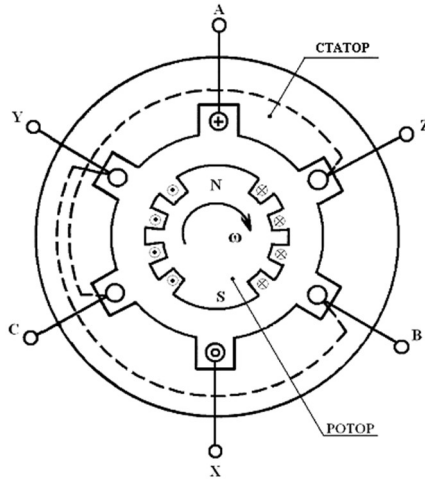


Рис 4.22. Будова трифазного синхронного генератора

На електричних схемах обмотки статора трифазного генератора умовно зображають так, як це показано на рис. 4.23,а; за умовно позитивне напрямлення ЕРС в кожній фазі генератора приймають напрямлення від кінця до початку обмотки.

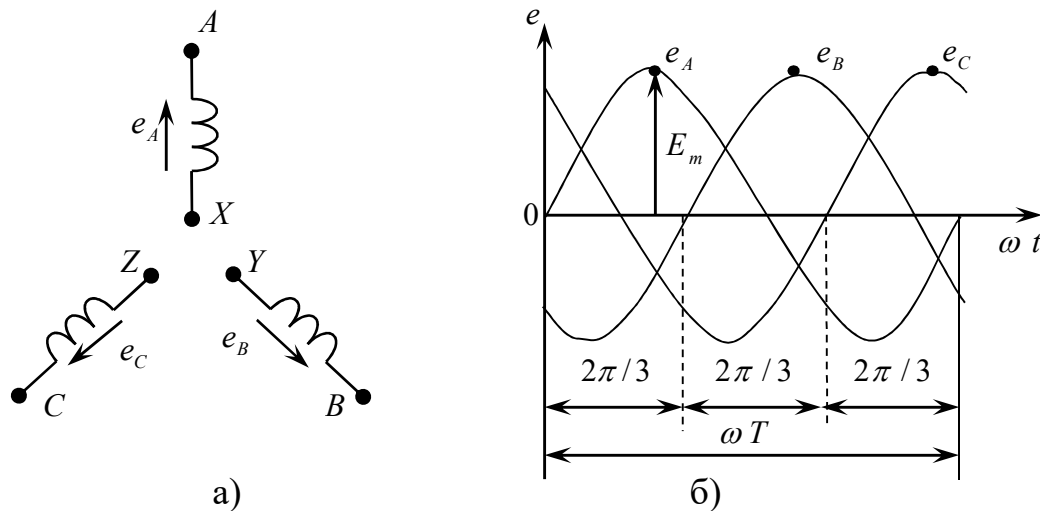


Рис. 4.23.

- а) – Умовне зображення обмоток на схемах;**
- б) – графіки кривих зміни ЕРС симетричної трифазної системи**

Якщо фазу фазної ЕРС А прийняти за вихідну і рівну нулю, то миттєві значення ЕРС трифазного генератора (рис. 4.23, б) можна виразити аналітично:

$$\begin{aligned}
 e_A &= E_m \sin \omega t \\
 e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\
 e_C &= E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3)
 \end{aligned}
 \tag{4.92}$$

Для симетричної трифазної системи ЕРС, згідно формули (4.92), правдива рівність:

$$e_A + e_B + e_C = 0.
 \tag{4.93}$$

Отже, алгебраїчна сума митьових значень ЕРС симетричної трифазної системи дорівнює нулю. Аналогічним чином, сума амплітуд або діючих значень ЕРС симетричної трифазної системи дорівнює нулю:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

На рис. 4.23,б показана зміна митьових значень ЕРС трифазного генератора, а на рис.4.24,а, б подані його векторні діаграми для прямої і зворотної послідовності чергування фаз. Послідовність, з якою ЕРС в фазних обмотках генератора приймають однакові значення, називають порядком чергування фаз, або послідовністю фаз.

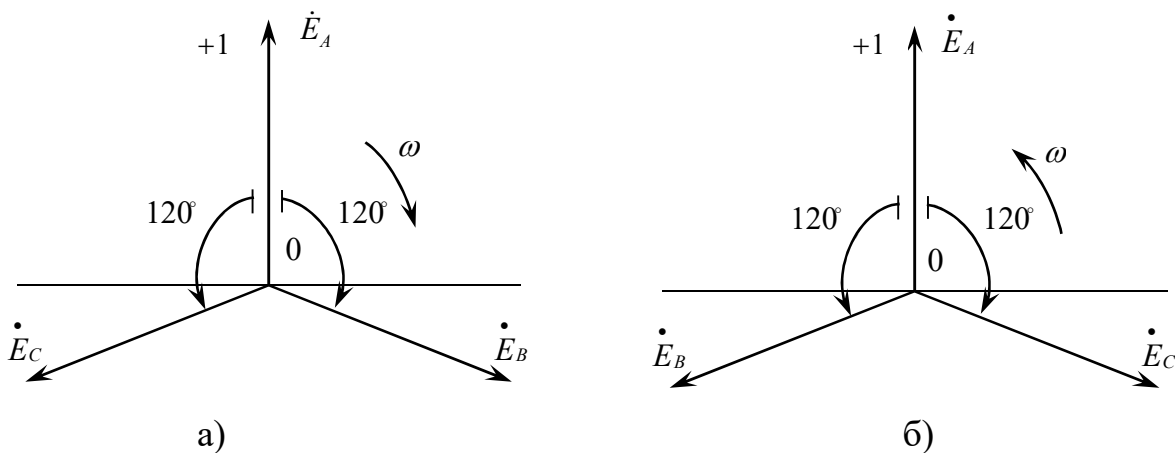


Рис. 4.24. Векторні діаграми:

а) – пряме чергування фаз; б) – зворотне чергування фаз

Якщо ротор генератора обертати в напрямку, показаному на рис. 4.22, то одержимо послідовність чергування фаз А→В→С, тобто ЕРС фази В відстає за фазою від ЕРС фази А і ЕРС фази С відстає за фазою від ЕРС фази В. Таку систему ЕРС називають системою прямої послідовності. Якщо змінити напрямок обертання ротора генератора на протилежний, то послідовність чергування фаз буде зворотнім. У генераторів ротори завжди обертаються за одним напрямком, внаслідок чого послідовність чергування фаз ніколи не змінюється. На практиці у генераторів зазвичай вживається пряме чергування фаз, а на розподільчих пристроях струмоведучі шини забарвлюються кольорами: фаза А – жовтим, фаза В – зеленим, фаза С – червоним. Це так зване правило ЖЗЧ.

Від послідовності чергування фаз залежить напрямок обертання трифазних асинхронних і синхронних двигунів. Досить змінити місцями два будь-яких живильних провoda на затискачах двигуна, як виникає зворотня послідовність чергування фаз і, отже, протилежний напрямок обертання двигуна.

Послідовність чергування фаз необхідно також враховувати при паралельному вмиканні в мережу кабельних та повітряних ліній електропередач генераторів, трансформаторів та іншого обладнання.

4.3.3. Способи з'єднання фаз джерела трифазного струму і співвідношення між його лінійними і фазними напругами

На рис. 4.25 показана схема трифазного кола, фази якого не зв'язані одна з одною. Таке трифазне коло називається незв'язаним. Оскільки, в незв'язаному трифазному колі кожна із фаз джерела зв'язується з приймачем двома проводами, то в такому разі необхідно мати шість з'єднувальних проводів. Незв'язані трифазні кола неекономічні, і на практиці не використовуються.

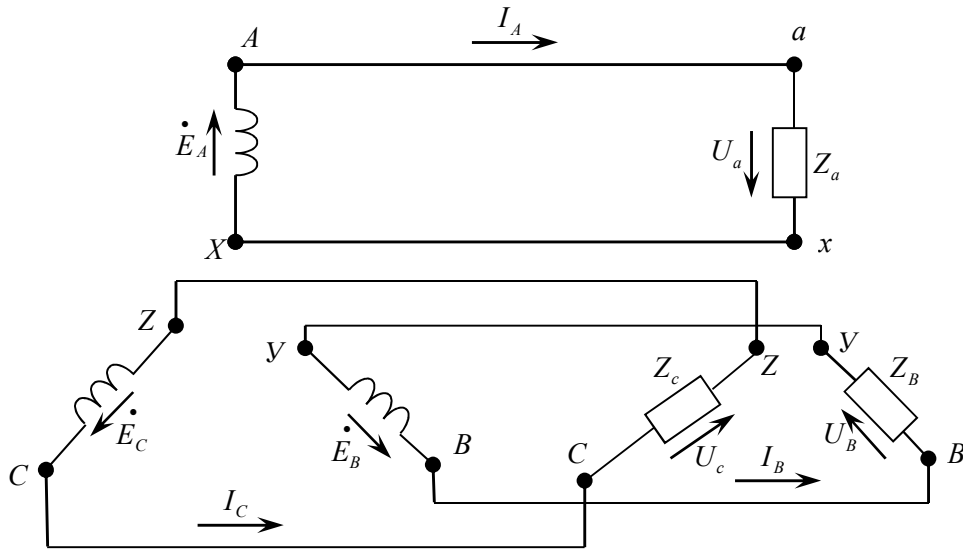


Рис. 4.25. Трифазне незв'язане коло

З метою зменшення числа з'єднувальних проводів у трифазній системі використовують кола, зв'язані між собою зіркою або трикутником.

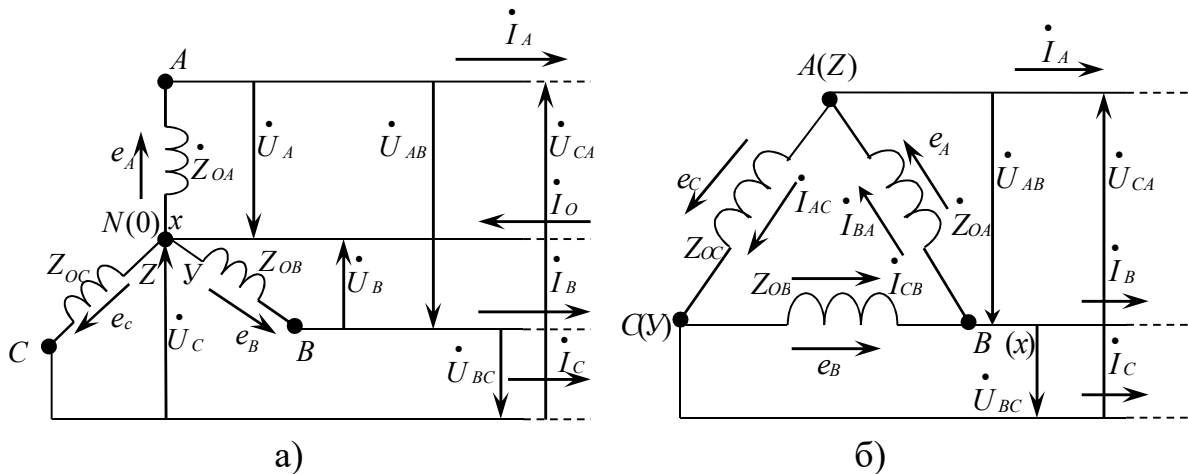


Рис. 4.26. Способи з'єднання фаз джерела трифазного струму:
а) – зіркою; б) – трикутником

Трифазна система, як відомо, створена і впроваджена в практику вченим – електротехніком М. Й. Доливо-Добровольським в 90-х роках 19 сторіччя, котрий винайшов всі ланки цієї системи – генератори, трансформатори, лінії електропередачі і двигуни трифазного струму.

При з'єднанні фаз джерела зіркою (рис. 4.26,а) кінці фаз X,Y,Z об'єднані в загальну точку N, що називається нейтральною, а початки фаз A,B,C за допомогою проводів з'єднані з приймачем трьома проводами, які називаються лінійними. Таку трифазну систему називають трипровідною.

При з'єднанні фаз джерела трикутником (рис. 4.26,б) необхідно під'єднати кінець кожної фази до початку наступної, тобто, кінець X першої фази – з початком B другої фази, кінець Y другої фази – з початком C третьої фази і кінець Z третьої фази – з початком A першої фази. Початки фаз A, B, C за допомогою проводів з'єднують з приймачами. Слід відмітити, що при з'єднанні трикутником фази джерела утворюють замкнутий контур, і на перший погляд може здатися, що в контурі при вимкнених приймачах може виникнути струм короткого замикання, проте він не виникає, оскільки в симетричній трифазній системі сума миттєвих значень ЕРС дорівнює нулю, тобто $e_A + e_B + e_C = 0$. Отже, при холостому ході джерела струм у його фазах не виникає.

З'єднання окремих фаз трифазних споживачів зіркою або трикутником здійснюється таким же чином, як і з'єднання джерел зіркою чи трикутником. При з'єднанні джерела, наприклад, зіркою приймачі можуть бути з'єднані різним способом, тобто одні – зіркою, а другі – трикутником і т.д. Якщо навантаження несиметричне, тобто опори фаз приймача не рівні між собою, то при з'єднанні джерел і приймача зіркою необхідно використовувати окрім трьох лінійних проводів четвертий, нейтральний (нульовий) провід, що з'єднує нейтральні точки N і N' джерела і приймача.

Напруги між початком і кінцем фази джерела називають фазними (U_ф). Наприклад, при з'єднанні зіркою фазними є напруги між початками фаз і нейтральною точкою джерела N : $U_A = U_B = U_C = U_{\phi}$ (рис. 4.26,а).

Фазними струмами (I_ф) називаються струми, що проходять через кожен фазу джерела або приймача. Напруги між початками A,B,C фаз джерела, або між лінійними проводами, називають лінійними напругами $U_L : U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$ (рис. 4.26,а), а струми в лінійних проводах I_A, I_B, I_C – лінійними струмами I_л.

Чотирипровідна трифазна мережа дозволяє одержати дві системи симетричних трифазних напруг: лінійну і фазну.

У таку мережу можуть бути включені як трифазні, так і однофазні приймачі.

Однофазні приймачі включаються або між лінійним і нейтральним проводом, або між лінійними проводами.

Однофазні приймачі, що включені між лінійним і нейтральним проводами, можна розглядати як з'єднані зіркою, а при включенні між лінійними проводами – як з'єднані трикутником.

На рис. 4.27 показана схема включення однофазних і трифазних приймачів: зліва – між лінійними і нейтральними проводами включені однофазні приймачі – лампи розжарювання; в правій стороні рисунка включені трифазні приймачі – трифазний двигун і батарея конденсаторів. На рис. 4.28 зображена схема заміщення мережі, що розглядається.

Для аналізу трифазних кіл важливо знати умовні позитивні напрямлення ЕРС, напруг і струмів, тому що від їх вибору залежать знаки в рівняннях, що складаються за законами Кірхгофа, а також напрямки векторів на векторних діаграмах. Як вже зазначалось, за умовний позитивний напрямок ЕРС в кожній фазі джерела приймають напрямок від її кінця до початку, а за умовний позитивний напрямок напруги в кожній фазі джерела приймають напрямок від початку фази до її кінця, напрямок же фазних струмів співпадає з напрямком ЕРС в кожній фазі джерела (рис. 4.26, а,б).

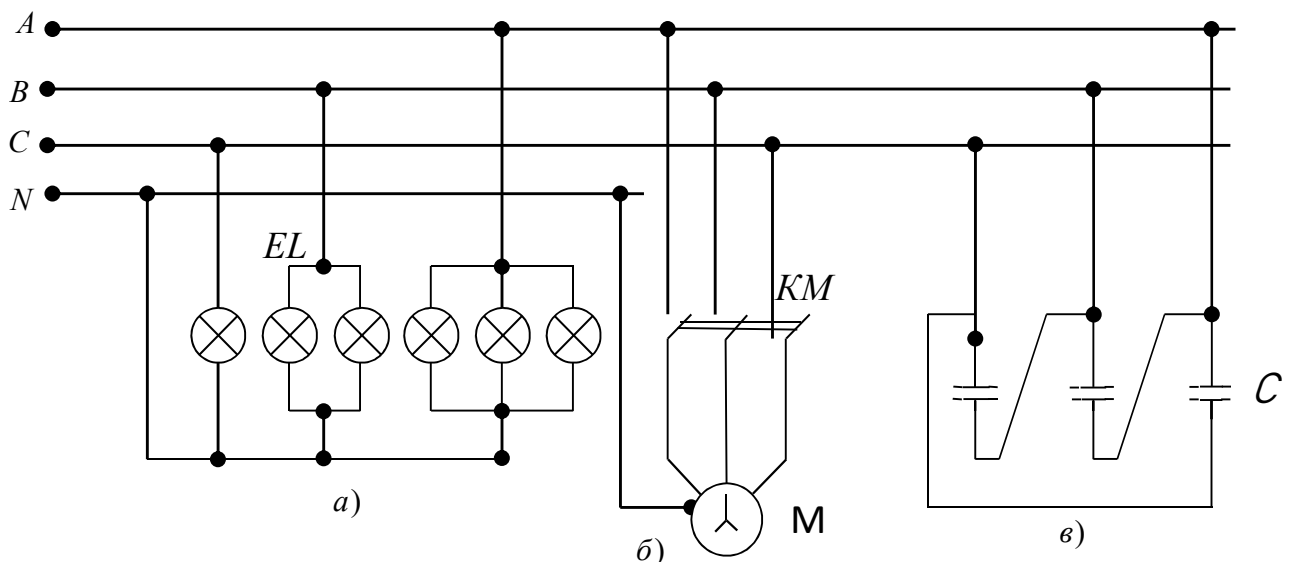


Рис. 4.27. Схема включення однофазних і трифазних приймачів:
а) – лампи розжарювання; б) – асинхронний двигун;
в) – батарея конденсаторів

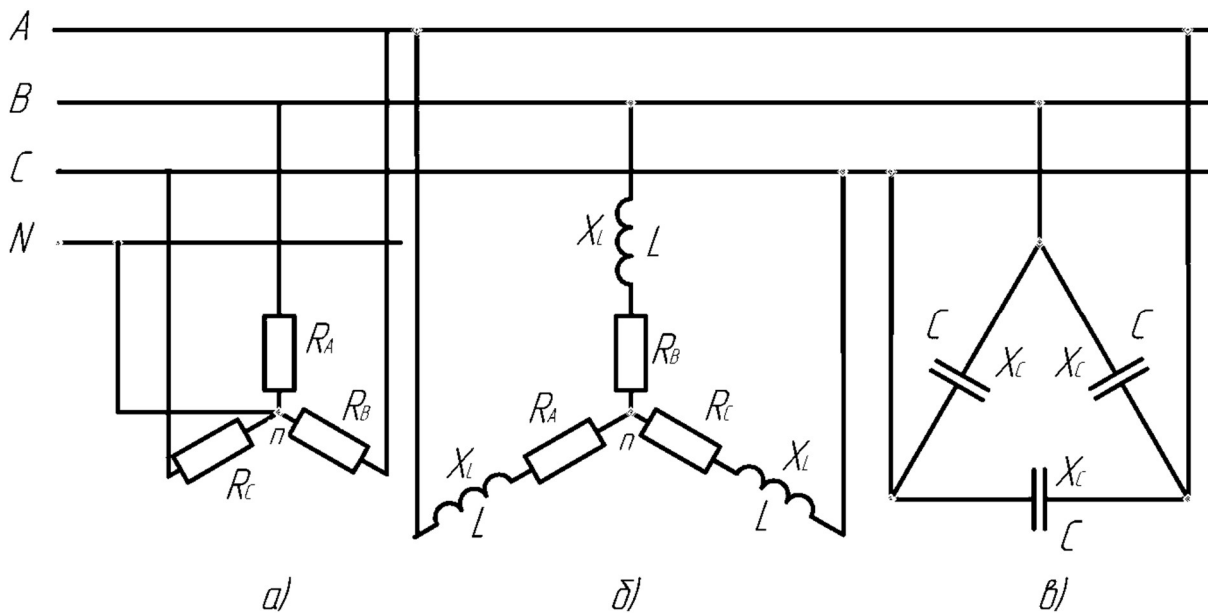


Рис. 4.28. Схема заміщення мережі Рис.4.23:

- а) – несиметричне навантаження; б) – симетричне з’єднання зіркою;
в) – симетричне з’єднане трикутником**

За умовний позитивний напрямок лінійних напруг приймають напрямок від початку однієї фази до початку другої, так, наприклад, напруга U_{AB} спрямована від А до Б, напруга U_{BC} – від В до С, напруга U_{CA} – від С до А. Лінійні струми, що протікають через лінійні провода, завжди мають напрямок від джерела до приймача (рис. 4.26, а,б). Фазні напруги і струми приймачів мають напрямок в ту саму сторону.

За другим законом Кірхгофа, ЕРС, фази АХ при з’єднанні зіркою (рис.4.26,а).

$$\dot{E}_A = \dot{I}_A Z_{0A} + \dot{U}_A,$$

Звідки $\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{I}_A Z_{0A}$, де Z_{0A} – внутрішній опір фази А джерела. Аналогічно визначаються напруги в двох інших фазах:

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{I}_B Z_{0B}; \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{I}_C Z_{0C}$$

На практиці споживачі підключають не до окремого джерела, а до мережі, що живиться від системи паралельно працюючих генераторів (трансформаторів). Через це зазвичай нехтують внутрішнім опором фаз джерел і приймають фазні ЕРС рівними фазним напругам.

Для того, щоб визначити зв’язок між фазними і лінійними напругами, при з’єднанні джерел ЕРС зіркою, згідно з вибраними умовними позитивними напрямками фазних і лінійних напруг за другим законом Кірхгофа, можна записати такі співвідношення:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_B - \dot{U}_A = 0; \dot{U}_{BC} + \dot{U}_C - \dot{U}_B = 0; \dot{U}_{CA} + \dot{U}_A - \dot{U}_C = 0;$$

Звідки

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \quad (4.94)$$

Для симетричних джерел

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi; U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\Delta.$$

По співвідношеннях (4.94), за відомими значеннями фазних напруг, можна побудувати векторні діаграми фазних і лінійних напруг джерела, при з'єднанні його фаз зіркою (рис. 4.29, а, б), які будуть являти собою симетричну систему векторів, оскільки система фазних і лінійних напруг трифазних генераторів, що живлять електричну мережу, внаслідок їх конструктивних особливостей симетрична.

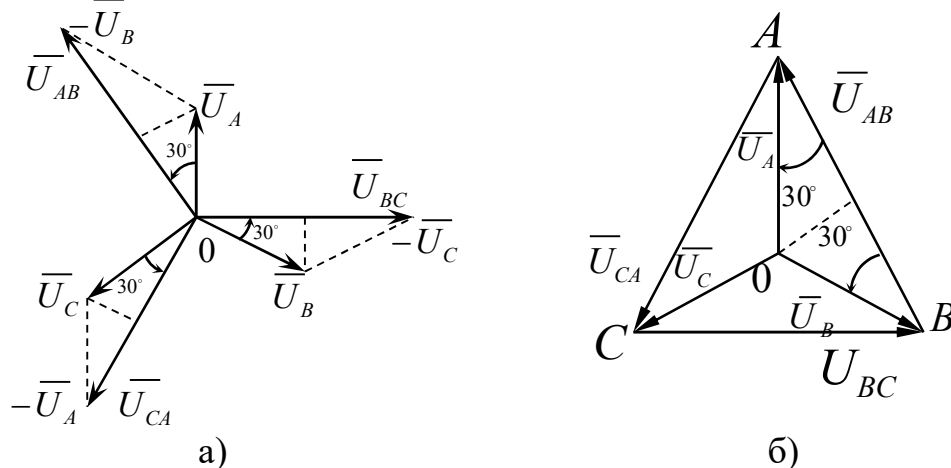


Рис. 4.29. Векторні діаграми фазних і лінійних напруг джерела при з'єднанні його фаз зіркою

Векторна діаграма приведена на рис. 4.29, а, відповідає симетричній системі фазних і лінійних напруг при з'єднанні джерел зіркою. У цьому випадку на діаграмі як фазні, так і лінійні напруги відповідно рівні і зсунуті відповідно одина до одної на кут $2\pi/3$. Окрім того, із векторної діаграми видно, що вектори лінійних напруг U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} випереджають за фазою, відповідно, вектори фазних напруг U_A, U_B, U_C на кут $2\pi/6$.

Векторну діаграму фазних і лінійних напруг джерела при з'єднанні зіркою можна подати і так, як показано на рис. 4.29, б, де лінійні напруги зображені векторами, що з'єднують відповідні вектори фазних напруг.

Із векторних діаграм (рис. 4.29 а, б) можна одержати співвідношення, що пов'язують між собою фазні та лінійні напруги симетричного джерела при з'єднанні зіркою. Отже, для фази А із трикутника АОВ (рис. 4.29 б).

$$\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ$$

або $\frac{U_\Delta}{2} = U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}$ і $U_\Delta = \sqrt{3} U_\phi$. (4.95)

Таким чином при з'єднанні фаз симетричного джерела зіркою, лінійна напруга в $\sqrt{3}$ більше фазних напруг.

Для приймачів низької напруги передбачені державним стандартом номінальні напруги: $U_\Delta = 660B$ і $U_\phi = 380B$; $U_\Delta = 380B$ і $U_\phi = 220B$; $U_\Delta = 220B$ і $U_\phi = 127B$. Вони пов'язані між собою співвідношенням (4.95).

Поміркувати: яке буде співвідношення між лінійною і фазною напругою у випадку, коли одна фаза включена невірно.

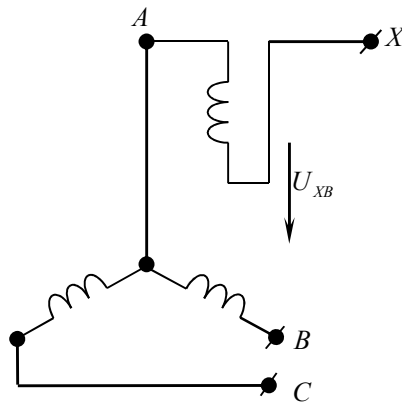


Рис. 4.30.

Слід відмітити, що в практиці експлуатації синхронних генераторів фази, їх трифазних обмоток з'єднують тільки зіркою, тому що при відхиленні ЕРС джерела від синусоїдної форми через наявність вищих гармонік, сума миттєвих значень ЕРС не буде дорівнювати нулю. При з'єднанні фаз синхронного генератора трикутником при холостому ході в його обмотках будуть виникати струми, які викликать їх нагрівання та зниження ККД генератора.

Із рис. 4.29, б, видно, що при з'єднанні фаз джерела трикутником лінійні напруги дорівнюють фазним: $U_\Delta = U_\phi$.

Отже, незалежно від способу з'єднання фаз джерела, лінійні напруги між лінійними проводами трифазної мережі однакові і зсунуті за фазою одна відносно одної на кут $2\pi/3$, внаслідок чого сума їх миттєвих значень або векторів завжди дорівнюють нулеві. Проте значення лінійних напруг при з'єднанні фаз джерела трикутником будуть $\sqrt{3}$ менше, ніж значення лінійних напруг при з'єднанні фаз того самого джерела зіркою.

4.3.4. Трифазні кола з симетричними і несиметричними приймачами

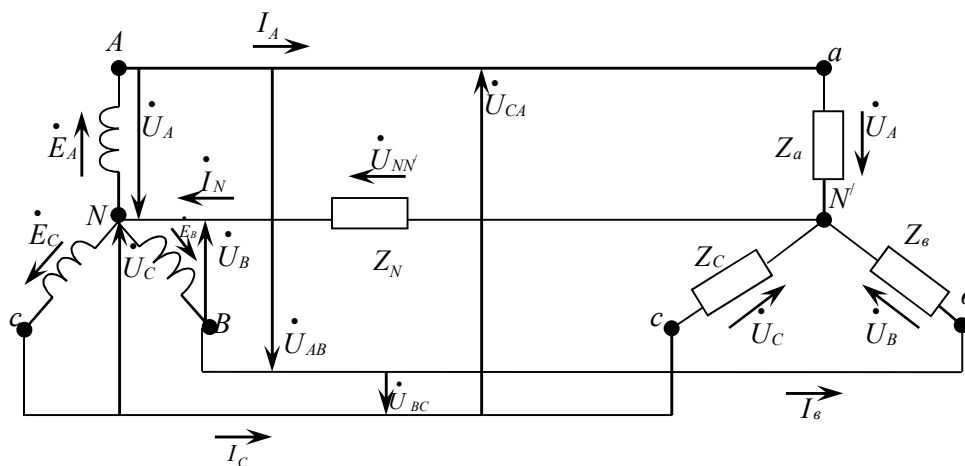
4.3.4.1. З'єднання зіркою при симетричному навантаженні

Для з'єднання приймачів зіркою кінці фаз приймача з'єднані в один загальний вузол N' . При цьому кінці всіх фаз генератора з'єднані в загальний вузол N , а початки фаз – з навантаженням – зіркою опорів.

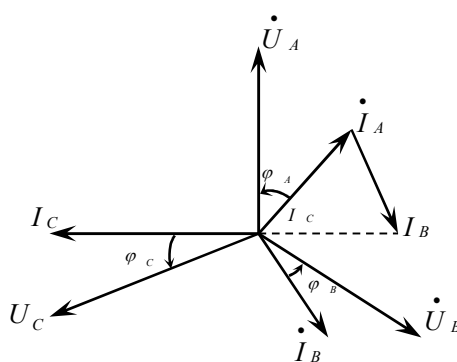
Якщо вузли N і N' з'єднати проводом, який називають нейтральним, з опором Z_n , то одержимо чотирипровідну систему (рис. 4.31,а). Опори проводів, що з'єднують джерело з навантаженням, можна врахувати в опорах навантаження Z_a, Z_b, Z_c .

Оскільки при з'єднанні зіркою фази генератора з'єднані послідовно з фазами навантаження, лінійні струми одночасно є і фазними струмами як у фазах генератора, так і у фазах навантаження:

$$I_\phi = I_l \quad (4.96)$$



а)



б)

Рис. 4.31. а) – чотирипровідна трифазна система;
б) – векторна діаграма напруг і струмів при симетричному навантаженні

За умовний позитивний напрямок лінійних струмів I_A, I_B, I_C , приймають напрямок від джерела до навантаження, а за позитивний напрямок струму в нейтральному проводі – від навантаження до джерела.

Згідно першому закону Кірхгофа, струм у нейтральному проводі дорівнює геометричній сумі фазних струмів, що сходяться в нейтральній точці навантаження:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (4.97)$$

За симетричним навантаженням $\dot{U}_a = \dot{U}_b = \dot{U}_c$ і $Z_a = Z_b = Z_c$, через це струми у фазах приймача рівні за значенням і зсунуті за фазою на один і той же кут відносно відповідних напруг, тобто $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$.

Векторна діаграма напруг і струмів для симетричного навантаження зображена на рис. 4.31, б. Із діаграми видно, що геометрична сума фазних струмів дає замкнутий рівносторонній векторний трикутник і рівнодіючий вектор, тобто вектор струму в нейтральному проводі, дорівнює нулю.

Таким чином, якщо навантаження рівномірне, то необхідність в нейтральному проводі відпадає. Трифазне коло без нейтрального проводу буде трипровідним (рис. 4.32).

Із схеми (рис. 4.31, а) і векторної діаграми (рис. 4.31, б) виходить, що при з'єднанні зіркою симетричних (трифазних) споживачів

$$U_\phi = \frac{U_l}{\sqrt{3}} \text{ і } I_\phi = I_l.$$

Для визначення струмів при симетричному навантаженні досить визначити струм лише в одній із фаз, що входять в трифазне коло.

В трипровідне коло при з'єднанні навантаження зіркою включаються тільки симетричні приймачі: електродвигуни, електричні печі та інші.

Оскільки кожна фаза реального симетричного трифазного кола складається із однакових елементів, то в інженерній практиці такі кола часто зображаються однолінійними (рис. 4.33).

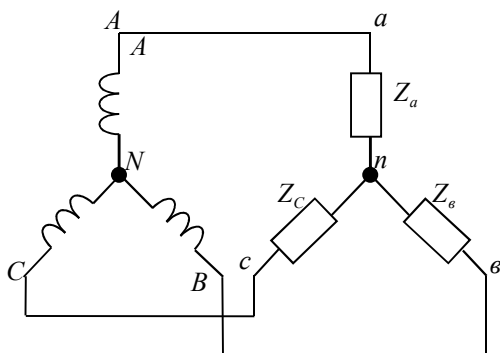


Рис. 4.32. Трипровідне трифазне коло

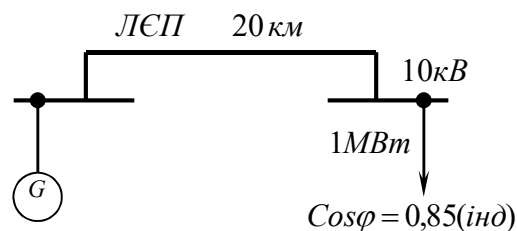


Рис. 4.33. Однолінійне трифазне коло

За несиметричним навантаженням опори приймача не однакові, тобто $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$. Для несиметричних навантажень використовують чотирипровідні кола рис. 4.31, а, оскільки між точками N і N' з'являється напруга $U_{NN'}$ і напруги на фазах навантаження різні.

В такому випадку порушується співвідношення між фазними і лінійними напругами $U_n = \sqrt{3}U_\phi$. В залежності від величини опору, на одних фазах навантаження напруга становиться більшою, а на інших меншою, чим $U_n / \sqrt{3}$.

Отже, при несиметричному навантаженні $R \neq X_L \neq X_C$ (рис. 4.34, а), завдяки нейтральному проводу, напруга на кожній із фаз приймача залишиться незмінною і рівною відповідним фазним напругам джерела живлення як за величиною, так і за фазою. Але струми у фазах будуть різними. Отже, нейтральний провід забезпечує симетрію фазних напруг споживача при несиметричному навантаженні. Через це в чотирипровідну мережу включають однофазні несиметричні споживачі, до яких відносяться електричні лампи, нагрівальні прилади, однофазні двигуни і ряд інших споживачів. Ці споживачі підключаються на фазну напругу, яка в $\sqrt{3}$ раз менше лінійної напруги мережі.

Нейтральний провід забезпечує режим роботи кожної фази приймача, що знаходиться під незмінною напругою джерела живлення, незважаючи на режим роботи інших фаз.

Струми у фазах споживачів можна визначити за формулами:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Струм в нейтральному проводі $\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$ залежить не тільки від характеру навантаження фаз приймача, але і від схеми їх вмикання (рис. 4.34,б).

За таких умов струм у нейтральному проводі звичайно виявляється меншим кожного із лінійних струмів. Виходячи з цього, переріз (діаметр) нульового проводу приймають рівним приблизно половині перерізу лінійного проводу. Це дає значну економію провідного металу.

При несиметричному навантаженні в разі обірвання нейтрального проводу ($Z_N = \infty$) напруга $\dot{U}_{NN'}$ стане максимальною. У фазах споживачів можуть виникнути перенапруги, через це в нейтральний провід не вмикають ні плавкі запобіжники, ні рубильники, ні вимикачі.

Поміркувати: 1) Як буде змінюватися струм в нейтральному проводі при зміні місцями конденсатора і котушки у фазах B і C ?

2) Як зміняться у чотирипровідній системі напруги на фазах навантаження, з'єднаних зіркою, при обриві нульового (нейтрального) провoda, якщо навантаження: а) – симетричне; б) – несиметричне?

3) Як практично можна визначити, який із проводів чотирипровідної мережі змінного струму являється нульовим?

4) У несиметричну систему може перетворитися, наприклад, симетрична система, якщо одну із фаз, припустимо, фазу А, з'єднати (помилково) в зворотну сторону, тобто якщо з нейтральною (нульовою) точкою буде з'єднаний не кінець фази-Х, а її початок – А (рис. 4.35).

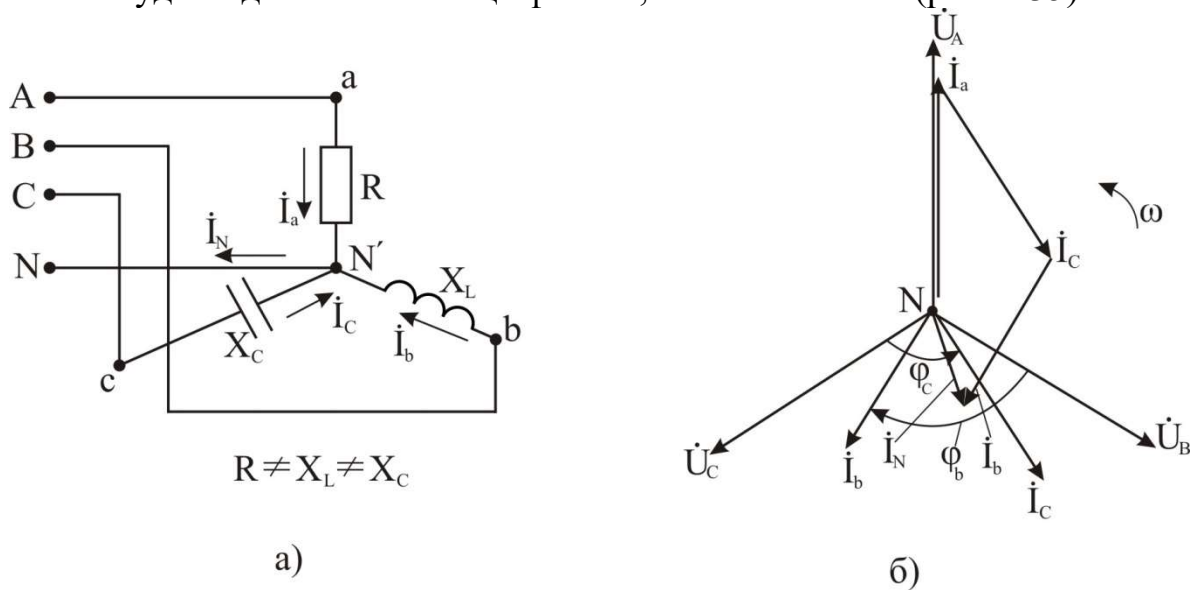


Рис. 4.34. Трифазне коло, з'єднане зіркою з нейтральним проводом при несиметричному навантаженні:

а) – схема; б) – векторна діаграма напруг і струмів

Яке буде співвідношення між лінійною і фазовою напругами на затискачах X, B, C?

Чи зміниться струм I_N у нейтральному проводі?

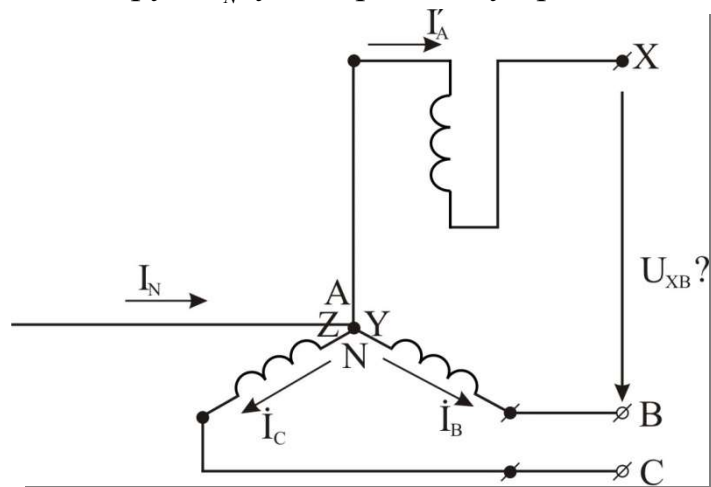


Рис. 4.35. Трифазне коло при неправильному з'єднанні фази А

4.3.4.2. З'єднання трикутником при симетричному навантаженні

Якщо три фази споживачів з опорами Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} ввімкнути безпосередньо між лінійними проводами трипровідного кола (кінець кожної фази трифазного споживача з'єднати з початком наступної фази), то одержимо з'єднання споживачів трикутником (рис.4.36). Якщо врахувати опір лінійних проводів Z_A , Z_B , Z_C , то потенціали вершин цього трикутника будуть відрізнятись від потенціалів затискачів джерела, через це затискачі трифазного приймача позначені a , b , c .

Із схеми рис.4.36 видно, що кожна фаза споживачів безпосередньо ввімкнена на лінійну напругу, тобто при з'єднанні трикутником

$$U_\phi = U_l. \quad (4.98)$$

Проте при з'єднанні трикутником, на відміну від з'єднання зіркою фазні і лінійні струми не дорівнюють один одному. У приймачів умовно прийняті позитивні напрямки лінійних напруг співпадаючими з умовними позитивними напрямками фазних струмів.

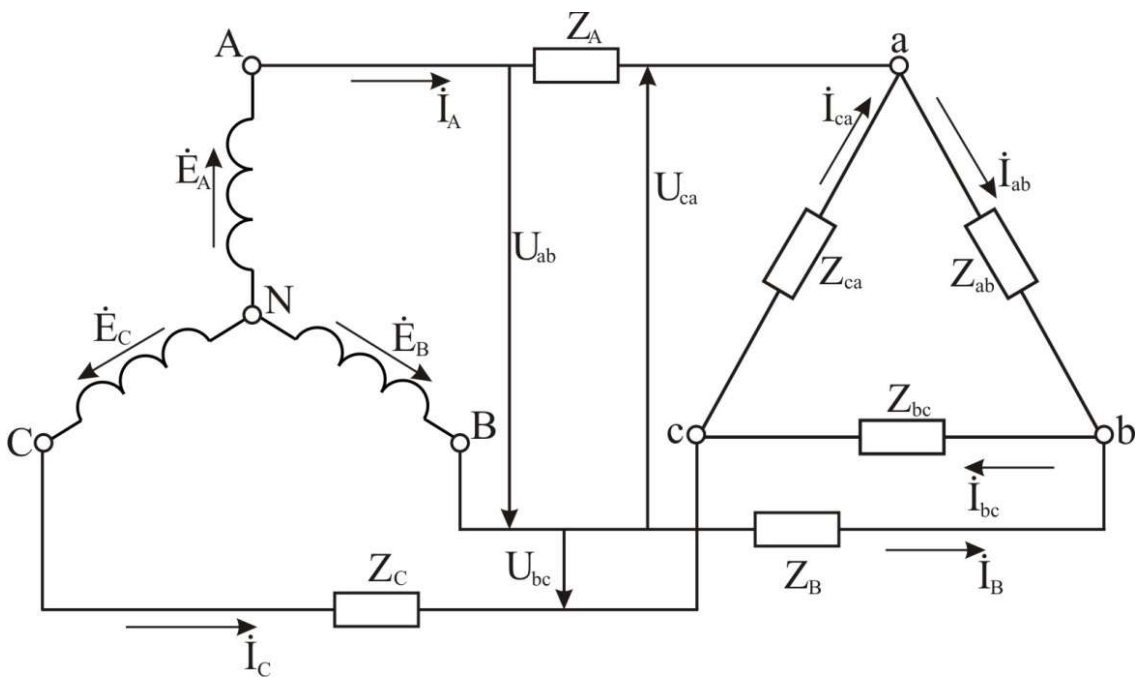


Рис. 4.36. З'єднання споживачів трикутником

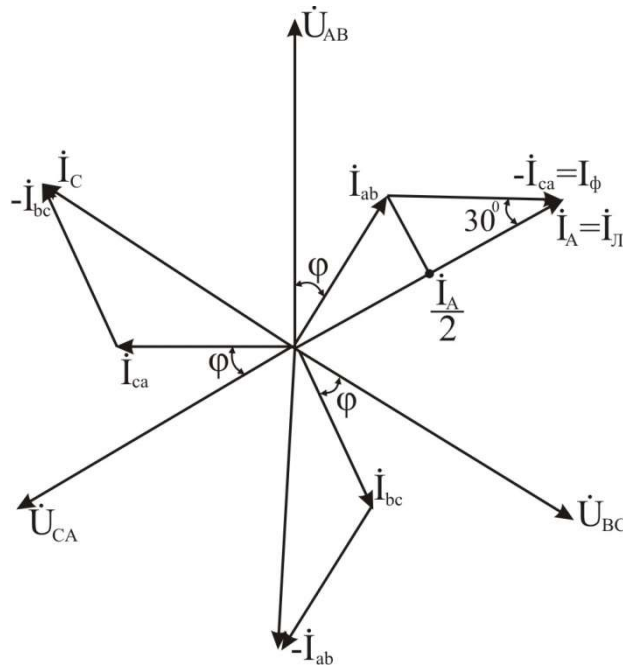


Рис. 4.37. Векторна діаграма струмів і напруг при симетричному навантаженні, з'єднаним трикутником

Застосовуючи перший закон Кірхгофа до вузлових точок a , b і c , визначаємо лінійні струми:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \quad (4.99)$$

де $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ – лінійні струми;

$\dot{I}_{ab}; \dot{I}_{bc}; \dot{I}_{ca}$ – фазні струми.

Із рівнянь (4.99) виходить, що значення лінійних струмів $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ дорівнюють геометричній різниці векторів відповідних фазних струмів.

Якщо відомі опори фаз споживача, то можна визначити фазні струми за законом Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (4.100)$$

Із рівнянь (4.99) також випливає, що геометрична сума векторів лінійних струмів в трипровідному колі дорівнює нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (4.101)$$

Оскільки напруги $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ca}$, то при симетричному навантаженні, тобто коли комплекси повних опорів фаз $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$,

також рівні між собою фазні струми і кути зсуву їх фаз по відношенню до відповідних фазних напруг:

$$|\dot{I}_{ab}| = |\dot{I}_{bc}| = |\dot{I}_{ca}| = I_{\phi}; \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi.$$

На рис. 4.37 зображена векторна діаграма струмів і напруг при симетричному навантаженні, з'єднаного трикутником. Із векторної діаграми видно, що фазні струми зсунуті відносно один одного на кут $2\pi/3$ (120°) і що лінійні струми відстають від відповідних фазних струмів на кут $\pi/6$ (30°). На підставі цієї ж векторної діаграми (див. трикутник з лінійним струмом \dot{I}_A) знаходимо співвідношення між лінійним \dot{I}_A і фазним \dot{I}_{ca} струмами:

$$|\dot{I}_A| = 2|\dot{I}_{ca}| \cos 30^\circ = \sqrt{3}|\dot{I}_{ca}|; I_L = 2I_{\phi} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{\phi}.$$

Такі ж співвідношення будуть і в інших фазах. Отже, при з'єднанні трикутником і симетричному навантаженні лінійні струми в $\sqrt{3}$ разів більші фазних струмів:

$$I_L = \sqrt{3}I_{\phi}.$$

Якщо навантаження симетричне, то зазвичай розрахунок виконують для однієї фази:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} \cdot e^{-j2\pi/3}; \dot{I}_c = \dot{I}_{ab} \cdot e^{j2\pi/3};$$

$$I_L = \sqrt{3}I_{\phi} \quad (4.102)$$

Поміркувати: При симетричному навантаженні, з'єднаного трикутником (рис. 4.36), лінійний струм $I_A = 6A$. Як зміниться I_A , якщо це навантаження з'єднати зіркою?

4.3.4.3. З'єднання трикутником при несиметричному навантаженні

Несиметричним навантаженням в загальному випадку буде таке навантаження, коли $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Проте навантаження несиметричне і в тому випадку, коли опір хоч би однієї із фаз не дорівнює опорам інших фаз. При несиметричному навантаженні фазні струми, кути зсуву фаз між фазними струмами і напругами, а також лінійні струми різні. При цьому фазні струми визначають, як і при симетричному навантаженні, за формулами (4.100), а лінійні струми – за формулами (4.99).

Лінійні струми можна також визначити і графічним шляхом, побудувавши векторну діаграму напруг і струмів (рис. 4.38). Геометрична побудова векторів лінійних струмів на діаграмі виконується у відповідності до формул (4.99).

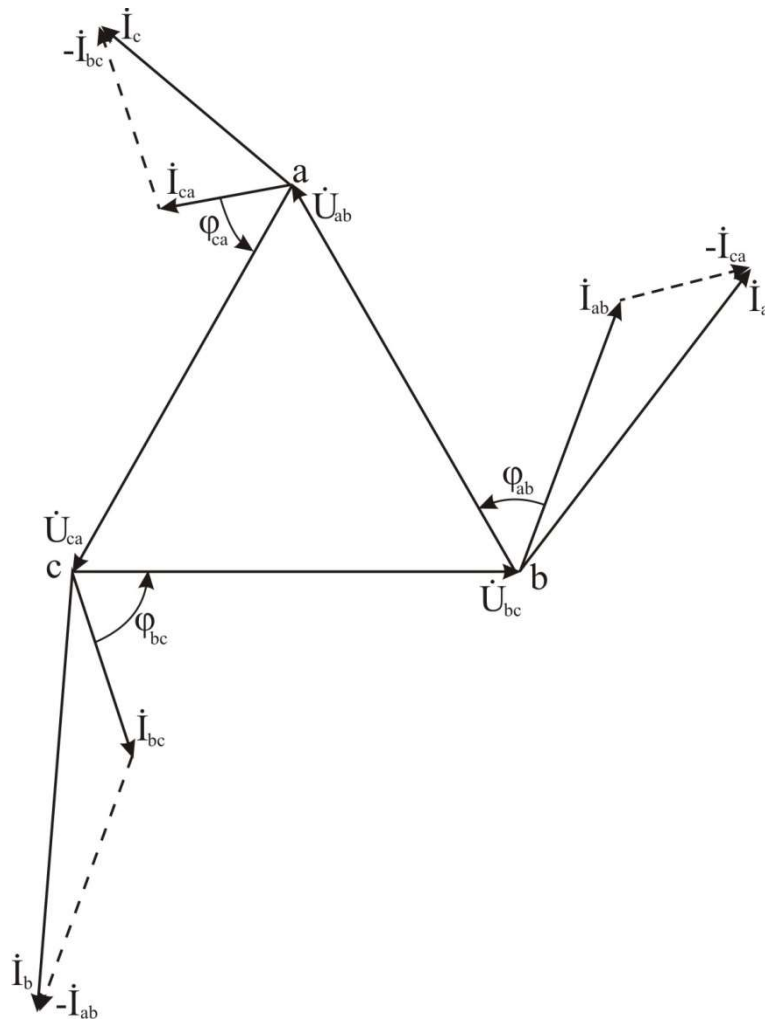


Рис. 4.38. Векторна діаграма фазних і лінійних струмів для випадку несиметричного навантаження при з'єднанні трикутником

Необхідно відмітити, що відповідно до формул (4.99) геометрична сума векторів лінійних струмів в трифазному колі при несиметричному навантаженні фаз з'єднаних трикутником, так само як і при симетричному навантаженні, дорівнює нулю.

Якщо нехтувати опором лінійних проводів, то напруги на фазах споживачів будуть дорівнювати напругам джерела. В такому разі фази споживачів незалежні одна від одної, тобто зміна навантаження в якій-небудь одній фазі споживача викликає зміну струму тільки цієї фази і струмів у двох лінійних проводах, з'єднаних з цією фазою, але ніяким чином не позначиться на струмах інших фаз. Через це схема з'єднання трикутником часто використовується для вмикання несиметричного однофазного навантаження, зокрема, ламп розжарювання.

4.3.5. Потужність трифазного кола

До трифазного кола змінного струму вживаються всі поняття потужності змінного струму, які були встановлені для однофазного кола, а саме: активна потужність, реактивна потужність і повна потужність (див. п.п.4.2.3.1, 4.2.3.2, 4.2.3.3).

4.3.5.1. Потужність при несиметричному навантаженні

Як уже відмічалось вище, трифазне коло являє собою сукупність трьох однофазних кіл, через це активна і реактивна потужності трифазного кола дорівнюють сумам потужностей окремих фаз.

Активна потужність трифазного кола $P = P_a + P_b + P_c$ для схеми з'єднання фаз споживача зіркою або $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$ для схеми з'єднання трикутником.

Тут $P_a, P_b, P_c, P_{ab}, P_{bc}, P_{ca}$ – активні потужності фаз у схемах з'єднання зіркою і трикутником відповідно. Активна потужність кожної фази розраховується аналогічно, як і для однофазного споживача:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = R_\phi \cdot I_\phi^2. \quad (4.103)$$

Реактивна потужність трифазного кола $Q = Q_a + Q_b + Q_c$ для схеми з'єднання фаз споживача зіркою або $Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$ для схеми з'єднання трикутником. Реактивна потужність кожної фази розраховується так само, як і для однофазного споживача:

$$Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = X_\phi \cdot I_\phi^2. \quad (4.104)$$

Повна потужність трифазного кола

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4.105)$$

Зверніть увагу!

Але $S \neq S_a + S_b + S_c$ або $S \neq S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}$.

Потужності трифазного кола можуть бути визначені в комплексній формі. Так, для схеми з'єднання зіркою

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c = \dot{U}_a I_a^* + \dot{U}_b I_b^* + \dot{U}_c I_c^* = (P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c)$$

4.3.5.2. Потужність при симетричному навантаженні

За симетричним навантаженням потужності всіх фаз однакові, через це потужності трифазного кола дорівнює потроєній потужності однієї фази:

$$\begin{aligned} P &= 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi \\ Q &= 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi \\ S &= 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi. \end{aligned} \quad (4.106)$$

Для симетричного навантаження потужності можуть бути виражені й через лінійні напруги і струми.

За з'єднанням фаз споживачів зіркою

$$\begin{aligned}
 U_{\phi} &= U_{\text{Л}} / \sqrt{3}; \quad I_{\phi} = I_{\text{Л}}, \text{ через це} \\
 P &= 3(U_{\text{Л}} / \sqrt{3}) I_{\text{Л}} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi_{\phi} \\
 Q &= \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi_{\phi} \\
 S &= \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}.
 \end{aligned}
 \tag{4.107}$$

За з'єднанням фаз споживачів трикутником

$$\begin{aligned}
 U_{\phi} &= U_{\text{Л}}; \quad I_{\phi} = I_{\text{Л}} / \sqrt{3}, \text{ через це} \\
 P &= 3U_{\text{Л}} (I_{\text{Л}} / \sqrt{3}) \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi_{\phi} \\
 Q &= \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi_{\phi} \\
 S &= \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}}.
 \end{aligned}
 \tag{4.108}$$

Зазвичай паспортні дані трифазних споживачів задаються лінійними (діючими або ефективними) значеннями напруги та сили струму. За таких умов індекс „Л“ у позначеннях не зазначається.

Тоді незалежно від схеми з'єднання фаз споживачів потужності визначаються за формулами:

Активна потужність

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi. \tag{4.109}$$

Активна потужність – скалярна фізична величина.

[P]=1 Вт (ват).

Рекомендовано такі кратні й частинні одиниці активної потужності:

ТВт, ГВт, МВт, кВт;
мВт, мкВт, нВт.

Реактивна потужність

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi. \tag{4.110}$$

Реактивна потужність – скалярна фізична величина.

[Q]= ВА (вольт-ампер).

1 Вольт-ампер (ВА) дорівнює реактивній потужності однофазного струму при напрузі 1В, силі струму 1А і різниці фаз $\pi/2$ (90°) між напругою та силою струму ($\sin \varphi = 1$).

На практиці в електротехніці допускається застосування позасистемної одиниці реактивної потужності: вар (вольт-ампер реактивний).

1 вар=1 ВА.

Слід звернути увагу на те, що в приведених вище формулах потужності кут φ залишається кутом зсуву по фазі між фазовою напругою і струмом.

Повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI. \quad (4.111)$$

Повна потужність також є скалярна фізична величина, яка для кола змінного струму дорівнює максимальному значенню активної потужності в цьому колі.

[S]= ВА (вольт-ампер).

Вольт-ампер (ВА) дорівнює повній потужності, коли діючі (ефективні) значення напруги і сили однофазного струму дорівнюють відповідно 1В і 1А.

У колах постійного струму або за відсутності різниці фаз між напругою та силою струму в колах змінного струму (активне навантаження) вольт-ампер є еквівалентним до вата.

4.3.6. Коефіцієнт потужності трифазних споживачів

Для вивчення однофазних кіл було подано визначення коефіцієнта потужності і показана можливість його підвищення з відповідними розрахунками (див. п.4.2.3.10).

Як відомо, в сучасних умовах електропостачання промислових підприємств відбувається за допомогою трифазних мереж. Значна частина споживачів електроенергії – електричні двигуни, електропечі й перетворюючі установки є симетричними.

Багато промислових споживачів споживають із мережі, крім активної енергії, і реактивну енергію, яка йде на утворення магнітного та електричного полів, без яких робота багатьох пристроїв (трансформаторів, електродвигунів, різних типів перетворювачів і електромагнітних механізмів) в силу їх фізичних властивостей взагалі неможлива. При цьому індуктивність споживає реактивну потужність, а ємність її генерує.

Слід відмітити, що тільки активна потужність P , обумовлена перетворенням енергії первинного двигуна неелектричного походження в енергію електричну, має можливість здійснювати роботу і перетворюватися в корисну механічну, теплову, світлову чи хімічну енергію. Що ж до реактивної потужності Q , то вона не пов'язана з виконанням корисної роботи, а лише витрачається на утворення електромагнітного поля в електродвигунах, силових трансформаторах, індукційних печах, зварювальних трансформаторах, дроселях освітлювальних приладів, електромагнітних реле та ін.

Таким чином, реактивна потужність не перетворюється в інші види потужності, не потребує для свого виробництва витрати інших видів

енергії, вона не здійснює корисну роботу, через це чисто умовно, по суті, лише для зручності, називається потужністю.

Не дивлячись на те, що активна потужність, а отже і енергія на виробництво реактивної потужності безпосередньо не витрачається, все ж таки передача її електричною мережею викликає значні витрати активної енергії, котрі покриваються активною енергією генераторів (за рахунок додаткових витрат первинної механічної енергії палива). Крім того, передача реактивної потужності завантажує електричні мережі промислових підприємств і установлене електрообладнання, віднімає таким чином певну частку їх пропускної здатності.

Нескладний аналіз даних про споживання реактивної потужності окремими споживачами показує, що основну частину реактивної енергії споживають: асинхронні двигуни – до 40 % (сумісно з побутовими, сільськогосподарськими електродвигунами і асинхронними електроприводами власних потреб електростанцій), електропічні установки – 8 %, вентильні перетворювачі 10 %, трансформатори усіх ступенів трансформації (втрати в них) 35 %. В той час лінії електропередачі є значно меншими споживачами реактивної потужності: втрати в них складають лише 7 %.

Таким чином, реактивна потужність в електричних мережах необхідна для створення як потужних, так і малопотужних електромагнітних полів. У випадку неможливості з тих чи інших причин утворити такі поля в указаному вище обладнанні, воно працювати не буде.

Енергопостачальні організації поряд з активною потужністю, що споживає підприємство, проводять також облік реактивної потужності (на силових вводах підстанцій ставлять два лічильника – активної і реактивної енергії), а відповідно, вона повинна бути сплачена за діючим тарифом. При відсутності компенсації реактивної потужності споживачу-підприємству, як правило, доводиться переплачувати за споживання реактивної енергії до 30...40 % загальної вартості отриманої електроенергії. Тому підвищення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$), а відповідно і зниження споживання реактивної енергії є дуже важливою техніко-економічною задачею.

Найбільш діючим і ефективним способом зниження споживаної із мережі реактивної потужності є застосування установлених в місцях безпосереднього споживання реактивної енергії компенсуючих пристроїв (КП), які виробляють більшу частину необхідної реактивної енергії на шинах (приєднаннях) відповідних енергоспоживаючих установок.

Джерелами реактивної енергії в електричних мережах енергопотужних підприємств є потужні синхронні компенсатори (тобто синхронні машини, спеціально призначені для роботи в якості джерела реактивної потужності і які не несуть активного навантаження на валу) і

більш прості пристрої – конденсаторні батареї до складу яких входять спеціальні конденсатори на напругу 10кВ і називаються вони косинусними конденсаторами.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}, \quad (4.112)$$

де Q_C – реактивна потужність КП. Отже, чим більше буде реактивна енергія, що виробляється КП, установленими поблизу споживачів, тим вище буде коефіцієнт потужності $\cos \varphi$.

Синхронні компенсатори при всіх своїх перевагах істотно дорожчають мережі і ускладнюють експлуатацію електрообладнання, їх використання недоцільно в малопотужних системах енергоспоживання, якими являються більшість промислових підприємств.

Через це на промислових підприємствах для компенсації реактивної потужності від 5 до 10 Мвар переважно розповсюджені одержали конденсаторні компенсуючі пристрої (рис. 4.39,а). Вони відрізняються високою надійністю, простотою експлуатації, малими втратами активної енергії. Схема включення конденсаторних батарей в трифазну мережу високої напруги показана на рис. (4.39,а).

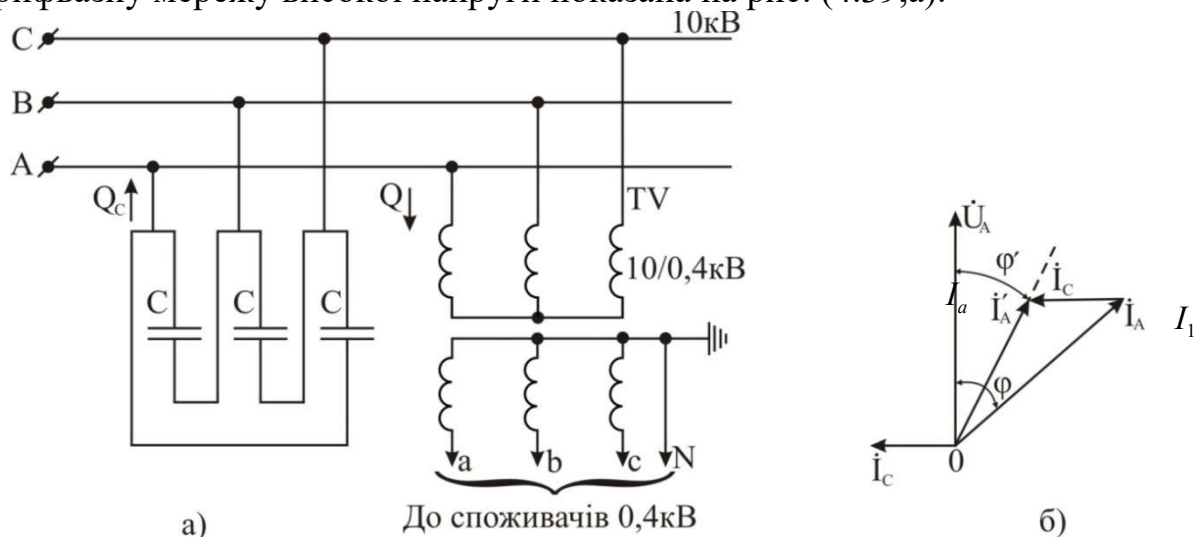


Рис. 4.39. : а) – схема вмикання в мережу 10/0,4 кВ конденсаторної батареї;

б) – векторна діаграма компенсації реактивного струму фази, С

Із векторної діаграми, побудованої для однієї фази приймача (рис. 4.39, б), видно, як визначити необхідну ємність і потужність конденсатора для одержання заданого $\cos \varphi$ (див. розрахунок п.4.2.3.10)

Підключаючи конденсатори до затискачів споживача, можна підвищити коефіцієнт потужності (в залежності від величини ємності) до

бажаних меж. Проте подальше підвищення коефіцієнта потужності нерационально, так як струм мережі зменшується досить незначно незважаючи на значне збільшення потужності батареї конденсаторів.

Розглянемо особливість розрахунку батареї конденсаторів для трифазної мережі.

За розрахунками підвищення коефіцієнта потужності від $\cos \varphi_1$, до $\cos \varphi_2$ ми одержали формули (4.62) і (4.63). З урахуванням ККД споживача потужність батареї конденсаторів, може бути розрахована за слідуючою формулою, квар:

$$Q_c = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} (tg \varphi_1 - tg \varphi_2), \quad (4.113)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність споживача, кВт; φ_1 і φ_2 – кути зсуву фаз між напругою і струмом відповідно до і після компенсації (визначається за значеннями $\cos \varphi_1$ і $\cos \varphi_2$; $\eta_{\text{ном}}$ – номінальне значення ККД споживача.

Відповідно з цим ємність кожної фази трифазної конденсаторної батареї, мкф, може бути визначена за формулою (див. 4.63)

$$C_{\phi} = \frac{P_{\text{ном}}(tg \varphi_1 - tg \varphi_2)}{6\pi f U_{\phi} * \eta_{\text{ном}} * 10^{-6}}, \quad (4.114)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга на затискачах конденсації батареї, В;

f – частота змінного струму, 50 Гц.

Із останнього рівняння випливає, що необхідна для заданих умов ємність конденсаторної батареї оберненопропорційна квадрату напруги. Через це з точки зору зменшення ємності конденсаторів для цілей компенсації за інших рівних умов, якщо це можливо, слід віддавати перевагу включенню конденсаторів на більш високі напруги. При цьому конденсаторна батарея може бути включена зіркою або трикутником. При з'єднанні трикутником напруга кожної фази конденсаторної батареї виявляється рівною лінійній напрузі мережі, тобто $U_{\phi} = U_{\text{л}}$.

Якщо врахувати, що лінійна напруга за з'єднанням батареї конденсаторів зіркою $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi}$, тобто в $\sqrt{3}$ разів більше фазного, то в разі з'єднання трикутником необхідна для компенсації коефіцієнта потужності у заданих межах ємність конденсаторної батареї виявляється втричі меншою, чим при з'єднанні її зіркою. Через це включення батареї конденсаторів трикутником слід рахувати переважним, якщо це допускає робоча напруга конденсаторів.

Сумарна ємність конденсаторної батареї незалежно від способу її включення визначається як потроєна фазна ємність конденсаторів

$$C = 3C_{\phi} . \quad (4.115)$$

Розглянемо конкретний приклад.

Приклад 4.20. Необхідно визначити ємність фази і повну ємність конденсаторної батареї, підключеної до затискачів трифазного

асинхронного двигуна з метою компенсації його коефіцієнта потужності до значення $\cos \varphi_2 = 0,92$.

Паспортні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 4,5$ кВт; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,76$; $\eta_{\text{ном}} = 0,83$.

Номінальна лінійна напруга двигуна $U_{\text{л.ном}} = 380$ В.

Розв'язання. За формулою (4.114) визначаємо ємність однієї фази конденсаторної батареї за підключенням її до споживача трикутником:

$$C_{\phi} = \frac{P_{\text{ном}}(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{\delta \pi f U_{\text{л}}^2 \eta_{\text{ном}} * 10^{-6}} = \frac{4,5 * 10^3 (0,854 - 0,488)}{6 * 3,14 * 30 * 380^2 * 0,83 * 10^{-6}} = 14,6 \text{ мкФ}$$

Сумарна ємність конденсаторної батареї при включенні трикутником:

$$C = 3C_{\phi} = 3 * 14,6 = 43,8 \text{ мкФ.}$$

За відсутності конденсаторів з номінальною напругою, відповідної напруги мережі, батарея конденсаторів може бути включена в мережу за з'єднанням зіркою. В цьому випадку ємність однієї фази конденсаторної батареї виявиться рівною:

$$C_{\phi} = \frac{4,5 * 10^3 * (0,854 - 0,488)}{6 * 3,14 * 50 \left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2 * 0,83 * 10^{-6}} = 43,8 \text{ мкФ.}$$

Необхідна ємність конденсаторної батареї за включенням зіркою:

$$C = 3C_{\phi} = 3 * 43,8 = 131,4 \text{ мкФ.}$$

На практиці потужність КП визначається на основі спеціальних техніко-економічних розрахунків, в результаті чого коефіцієнт потужності підвищується до межі, встановленої в державному порядку.

Слід відмітити, що поліпшення коефіцієнта потужності промислових підприємств перш за все повинно здійснюватися і без компенсуючих пристроїв, головним чином, за рахунок упорядкування енергетичного режиму обладнання, раціоналізації використання установлених потужностей асинхронних двигунів і трансформаторів, заміною мало завантажених двигунів двигунами меншої потужності, обмеження режимів холостого ходу трансформаторів у тому числі і зварювальних, двигунів та іншого обладнання.

4.3.7. Приклади розрахунку трифазних кіл

Приклад 4.21. У мережу трифазного струму з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380$ В увімкнено симетричне навантаження, з'єднане зіркою. Активний опір кожного приймача $R = 40$ Ом, індуктивний $X_L = 30$ Ом. Визначити величину фазного струму I_{ϕ} , повну S , активну P і реактивну Q потужності всіх приймачів.

Розв'язання.

1. Фазна напруга

$$U_{\phi} = \frac{U_{\mathcal{L}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} \approx 220 \text{ В.}$$

2. Повний опір кожної фази

$$\underline{Z}_{\phi} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ Ом.}$$

3. Величина фазного струму

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А.}$$

4. Коефіцієнт потужності фази

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{50} = 0,8 .$$

5. Активна потужність

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 4,4 \cdot 0,8 = 2323 \text{ Вт} \approx 2,3 \text{ кВт} .$$

6. Реактивна потужність

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 4,4 \cdot 0,6 = 1742 \text{ вар.}$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2} = \sqrt{1 - 0,64} = 0,6 .$$

7. Повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2323^2 + 1742^2} = 2904 \text{ ВА} = 2,9 \text{ кВА} .$$

Приклад 4.22. Трифазний симетричний споживач електроенергії з опорами фаз $|Z_A| = |Z_B| = |Z_C| = Z_{\phi} = R_{\phi} = 10 \text{ Ом}$ або $Z_A = Z_B = Z_C = Z_{\phi} = R_{\phi}$ з'єднаний зіркою і увімкнений в трифазну мережу з симетричною лінійною напругою $U_{\mathcal{L}} = 220 \text{ В}$ (рис.1 до задачі 4.22).

Визначити показання амперметра РА за симетричним навантаженням та за перегорання запобіжника у фазі В, побудувати векторну діаграму напруг і струмів при симетричному навантаженні і при обриві лінійного проводу фази В внаслідок перегорання запобіжника.

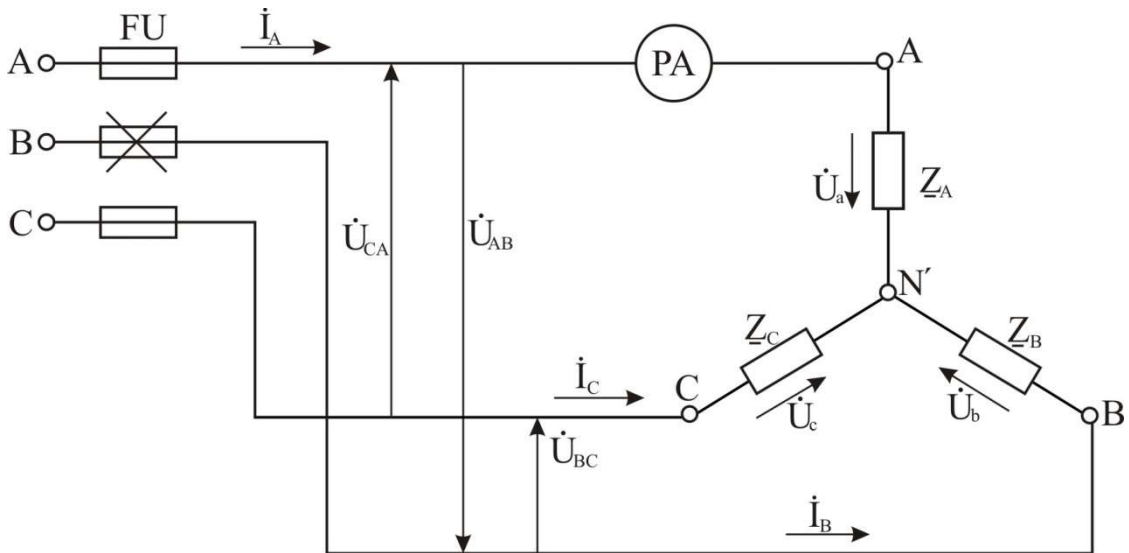


Рис. 1 до прикладу 4.22.
Симетрична схема споживачів, з'єднаних зіркою без нейтрального проводу.

Розв'язання.

1. За симетричним навантаженням.

У разі симетричного навантаження при з'єднанні споживачів зіркою розрахунок досить виконати для однієї фази, наприклад фази А.

1) визначаємо фазову напругу,

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В},$$

2) лінійний і фазовий струм фази А,

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R_{\phi}} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ А}.$$

Амперметр РА буде показувати діючу величину струму 12,7 А.

Оскільки система симетрична в інших фазах буде протікати також струм 12,7 А.

2. За несиметричним навантаженням у разі перегорання запобіжника у фазі В (обрив фази В).

Схема кола при обриві фази В приймає такий вигляд

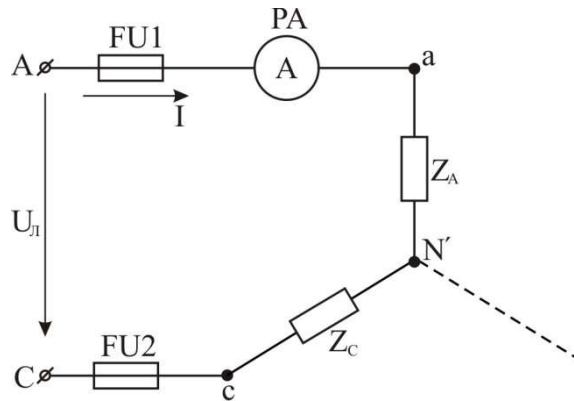


Рис. 2 до прикладу 4.22. Схема кола при обриві фази В

1) загальний опір навантаження,

$$Z = Z_A + Z_C = 10 + 10 = 20 \text{ Ом},$$

2) струм у колі

$$I = \frac{U_{\text{Л}}}{Z} = \frac{220}{20} = 11 \text{ А}.$$

Отже, при втраті однієї фази у колі амперметр РА показує величину струму 11 А. Різниця склала 1,7 А або 13,4% в сторону зменшення.

3. Побудова векторної діаграми при симетричному навантаженні.

Для побудови сумісної векторної діаграми напруг і струмів вибираємо масштаб напруги і струму:

$$m_U = \frac{40 \text{ В}}{\text{см}}; \quad m_I = \frac{5 \text{ А}}{\text{см}}$$

З урахуванням масштабу довжини векторів

$$l_{U_{\text{Л}}} = \frac{U_{\text{Л}}}{m_U} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ см},$$

$$l_{U_{\phi}} = \frac{U_{\phi}}{m_U} = \frac{127}{40} = 3,1 \text{ см},$$

$$l_{I_{\phi}} = l_{I_{\text{Л}}} = \frac{I_{\text{Л}}}{m_I} = \frac{11,7}{5} = 2,34 \text{ см}.$$

Будуємо симетричну векторну діаграму напруг (оскільки система симетрична); струми у фазах співпадають з напрямком фазових напруг (опори у фазах активні), рис.3 до задачі 4.21,а.

4. Побудова векторної діаграми при порушенні симетрії навантаження (втрата системою фази В внаслідок перегорання плавкої вставки запобіжника).

Для побудови векторної діаграми будемо дотримуватися попереднього масштабу.

У джерела великої потужності лінійні напруги однакові $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ і при втраті (обриві) фази споживача не змінюються і на векторній діаграмі утворюють замкнений трикутник з катетами лінійних напруг (рис.3 до задачі 4.21,б).

В разі обриву фази В нейтральна точка N' зміститься на векторній діаграмі із центру ваги трикутника лінійних напруг в точку N' сторони U_{CA} . Напруга між точкою розриву В і N' новою нейтральною точкою споживача N' складає (із трикутника $AN'B$):

$$U_b = \dot{U}_{AB} \cos 30^\circ = \dot{U}_{л} \cdot 0,866 = 220 \cdot 0,866 = 190,5 \text{ В}$$

Вектори, що з'єднують точку N з точками А, В або С, відповідно будуть векторами фазових напруг споживача. Напруги на фазах споживача

$$|\dot{U}_A| = |\dot{U}_C| = \frac{U_{CA}}{2} = \frac{220}{2} = 110 \text{ В.}$$

Струм фази В $\dot{I}_B = 0$. З'єднання фаз А і С (за відсутністю фази В) – послідовне, отже, вектори струмів

$$|\dot{I}_C| = -|\dot{I}_A| = 11 \text{ А.}$$

Будуємо вектори струмів з урахуванням їх масштабу та співпаданням напрямків струмів з напрямками фазових напруг (коло з активним навантаженням).

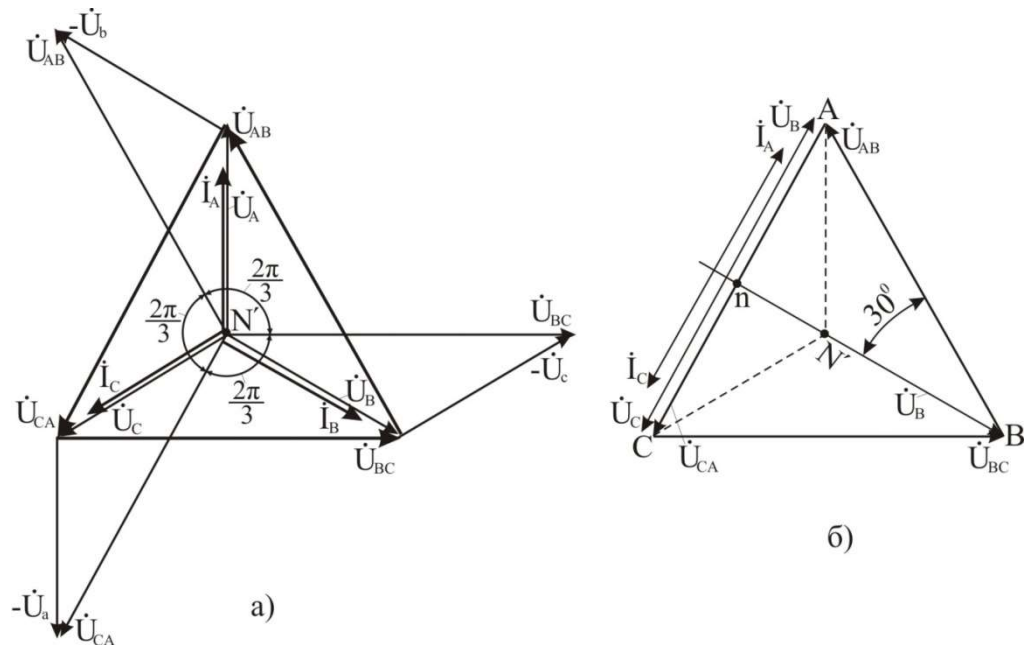


Рис. 3 до прикладу 4.22:
а) – векторна діаграма при симетричному навантаженні;
б) – векторна діаграма при обриві фази В

Приклад 4.23. Трифазний споживач електроенергії з активними і реактивними опорами: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = R_3 = 5 \text{ Ом}$ і $X_L = X_C = 5 \text{ Ом}$ фаз з'єднаний трикутником (рис.1 до задачі 4.23) і увімкнений в трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 100 \text{ В}$ при симетричному живленні.

Визначити показання амперметра РА при згорянні запобіжника фази С, тобто обриві лінійного провoda сС. Визначити фазні I_{ϕ} і лінійні $I_{\text{л}}$ струми, а також активну P , реактивну Q і повну S потужності кожної фази і всього електричного кола. Побудувати векторну діаграму струмів і напруг.

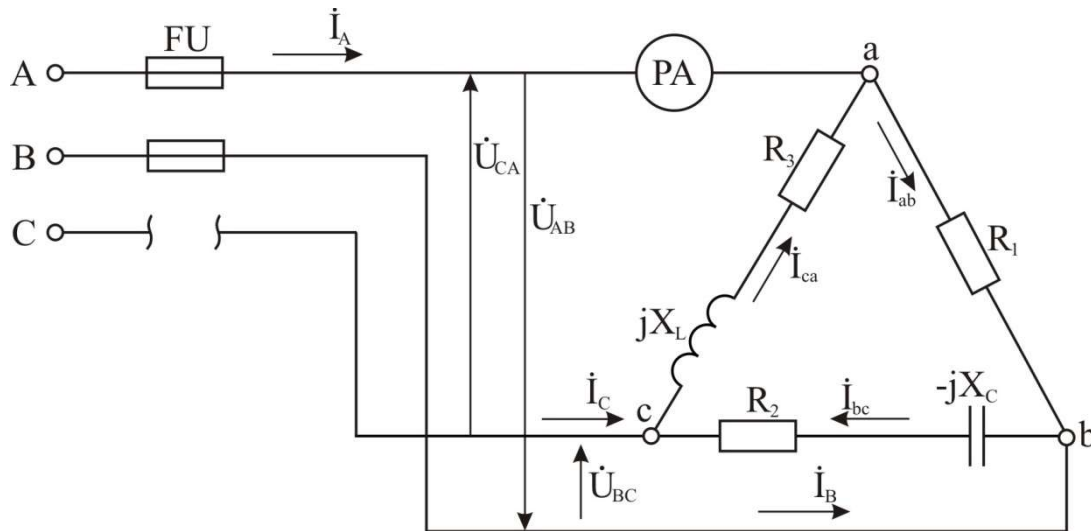


Рис. 1. до прикладу 4.23. Схема споживачів, з'єднаних трикутником

Розв'язання.

1. Повний опір паралельної ділянки *авс* кола при обриві лінійного провoda сС:

$$Z_1 = \sqrt{(R_2 + R_3)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(5 + 5)^2 + (5 - 5)^2} = \sqrt{10^2} = 10 \text{ Ом}$$

2. оскільки реактивні опори $X_L = X_C$, то у колі має місце резонанс напруг, при якому реактивні опори компенсують один одного, і в колі залишається лише активний опір $Z_1 = R_1 = 10 \text{ Ом}$.

3. Загальний опір кола при обриві лінійного провoda:

$$Z_0 = \frac{Z_1 R_1}{Z_1 + R_1} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = \frac{100}{20} = 5 \text{ Ом}$$

Із схеми заміщення мережі видно, що між проводами А і В увімкнений активний, між проводами В і С – активно-ємнісний, а між проводами С і А – активно-індуктивний споживачі енергії.

Опори фаз ВС і СА по модулю однакові, але за аргументом різні, отже навантаження несиметричне і струм у кожній фазі необхідно розраховувати окремо.

1. Запишемо значення лінійних напруг в комплексній формі, при цьому приймаємо, що вектор напруги \dot{U}_{AB} збігається з позитивним напрямком дійсної осі:

$$\dot{U}_{AB} = 100B; \varphi_{AB} = 0$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{AB} \cdot e^{-j120^\circ} = 100(\cos 120^\circ - j \sin 120^\circ) = (-50 - j86,5)B;$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j\varphi_1} = 100 \cdot e^{-j60^\circ}, B,$$

$$\text{де } U_{BC} = \sqrt{50^2 + 86,5^2} = 100B;$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{86,5}{50} = 60^\circ.$$

Аналогічно

$$\dot{U}_{CA} = U_{AB} \cdot e^{-j240^\circ} = U_{AB} \cdot e^{+j120^\circ} = 100(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = (-50 + j86,5)B$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{j\varphi_2} = 100 \cdot e^{j60^\circ}$$

2. Визначимо комплексні значення опорів фаз споживачів:

$$Z_{ab} = R_1 \cdot e^{\varphi_0} = R_1 = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_{bc} = R_2 - jX_C = 5 - jX_C = 5 - j5 = \sqrt{5^2 + 5^2} \cdot e^{-j \arctg 5/5} = 7,07 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{ca} = R_3 + jX_L = 5 + j5 = 7,07 \cdot e^{j45^\circ}$$

3. Розраховуємо за законом Ома струми споживачів окремих фаз

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{ab}} = \frac{100}{10} = 10 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}} = \frac{100 \cdot e^{-j60^\circ}}{7,07 \cdot e^{-j45^\circ}} = 14 \cdot e^{j(-60^\circ + 45^\circ)} = 14 \cdot e^{-j15^\circ} \text{ А};$$

або в алгебраїчній формі

$$\dot{I}_{BC} = 14(\cos 15^\circ - j \sin 15^\circ) = 14(0,97 - j0,26) = 13,5 - j3,62 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{ca}} = \frac{100 \cdot e^{j60^\circ}}{7,07 \cdot e^{j45^\circ}} = 14 \cdot e^{j15^\circ} \text{ А}.$$

4. Використовуючи перший закон Кірхгофа до вузлових точок А, В і С, визначимо лінійні струми (рівняння 4.99).

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 10 - 13,5 - j3,62 = -3,5 - j3,62 \text{ А} = 5 \cdot e^{j(45^\circ + 180^\circ)} = 5 \cdot e^{+}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 13,5 - j3,62 - 10 = 3,5 - j3,62 = 5 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 13,5 + j3,62 - 13,5 + j3,62 = j7,24 = 7,24 \cdot e^{+90^\circ} \text{ А}.$$

5. В трипровідній трифазовій системі, з'єднаних трикутником, сума лінійних струмів дорівнює нулю. Це перевіримо:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = -3,5 - j3,62 + 3,5 - j3,62 + j7,24 = -j7,24 + j7,24 = 0$$

6. Амперметр РА у фазі А буде показувати діюче значення струму (модуль) 5А.

7. Для побудови векторної діаграми напруг і струмів вибираємо масштаби:

$$m_U = \frac{20V}{\text{см}}; m_I = \frac{2,5A}{\text{см}}$$

На рис.2 до задачі 4.22 показана векторна діаграма.

На рисунку вектори фазових струмів \dot{I}_{AB} , \dot{I}_{BC} , \dot{I}_{CA} в масштабі, відкладені відносно дійсної осі під кутами:

$$\varphi_{\dot{I}_{AB}} = 0; \varphi_{\dot{I}_{BC}} = -15^\circ; \varphi_{\dot{I}_{CA}} = +15^\circ.$$

Потім у відповідності з рівнянням (4.99) побудовані вектори \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C , довжина і напрямок яких відповідають розрахунковим даним.

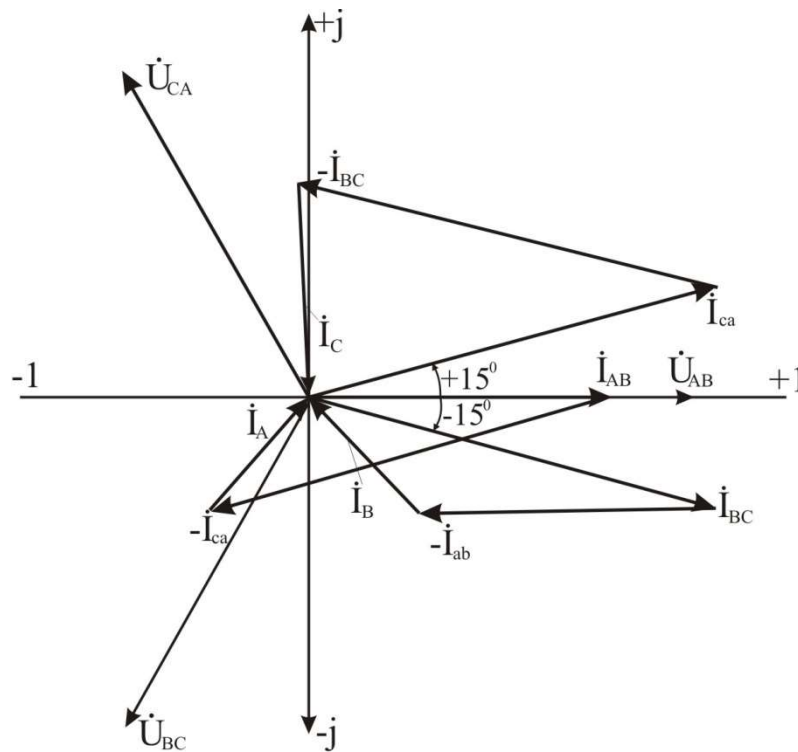


Рис. 2 до задачі 4.23.

Приклад 4.24. У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{л} = 100\text{В}$ увімкнені трикутником споживачі електроенергії з опорами: у фазі $AB - R_1 = 10\text{ Ом}$; у фазі $BC - R_2 = 5\text{ Ом}$ і $X_C = 5\text{ Ом}$; у фазі $CA - R_3 = 5\text{ Ом}$ і $X_L = 5\text{ Ом}$.

Визначити фазові та лінійні струми мережі, та побудувати векторну діаграму струмів при нормальній роботі; визначити ті самі параметри схеми і побудувати векторну діаграму при згорянні запобіжника у фазі С (втрата схемою фази С). В обох випадках розрахувати величини спожитих потужностей споживачами окремих фаз та цілою схемою.

Задачу розрахувати комплексним методом.

Схема заміщення трифазної мережі при з'єднанні споживачів трикутником приведена на рис.1 до задачі 4.24.

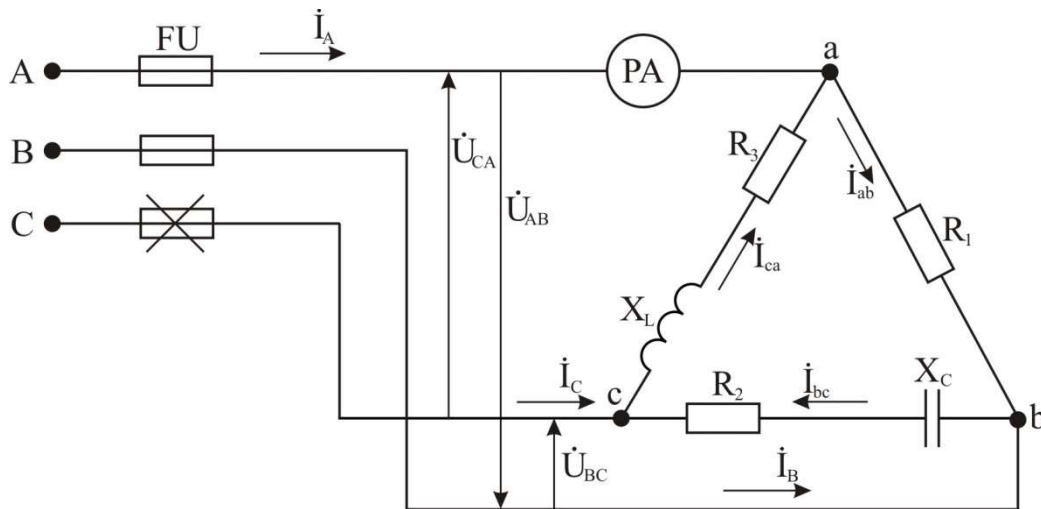


Рис. 1 до прикладу 4.24.

Схема заміщення мережі, з'єданого трикутником

Розв'язання.

а) Розрахунки мережі за нормальних умов роботи.

Розрахунок потужностей за нормальних умов роботи мережі.

1. Потужність фази АВ.

$$P_{ab} = I_{ab}^2 \cdot R_1 = 10^2 \cdot 10 = 1\text{ кВт}$$

2. Потужність фази ВС (за формулою 4.88).

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U}_{bc} \cdot I_{bc}^* = 100 \cdot e^{-j60^\circ} \cdot 14 \cdot e^{j15^\circ} = 1400 \cdot e^{j(-60^\circ+15^\circ)} = 1400 \cdot e^{-j45^\circ} = \\ &= 1400(\cos 45^\circ - j \sin 45^\circ) = (980 - j980)\text{ Вт}; \end{aligned}$$

$$P_{BC} = 980\text{ Вт},$$

$Q_{BC} = -980\text{ Вар}$ – знак мінус вказує на те, що у фазі ВС присутнє ємнісне навантаження,

$$S_{BC} = \sqrt{P_{BC}^2 + Q_{BC}^2} = \sqrt{980^2 + 980^2} = 1386\text{ ВА}.$$

Розрахунок можна виконати іншим способом:

$$P_{BC} = I_{BC}^2 \cdot R_{BC} = 14^2 \cdot 5 = 980 \text{ Вт};$$

$$Q_{BC} = I_{BC}^2 \cdot X_C = 14^2 \cdot 5 = 980 \text{ вар};$$

$$S_{BC} = 1386, \text{ ВА.}$$

3. Потужність фази СА.

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U}_{CA} \cdot I_{CA}^* = 100 \cdot e^{j60^\circ} \cdot 14 \cdot e^{-j15^\circ} = 1400 \cdot e^{j45^\circ} = \\ &= 1400(\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ) = (980 + j980) \text{ ВА}; \end{aligned}$$

$$P_{CA} = 980 \text{ Вт};$$

$$Q_{CA} = 980 \text{ вар};$$

$$S_{CA} = 1386, \text{ ВА.}$$

4. Загальна, активна і реактивна потужності:

$$P = \sum P_\phi = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 1000 + 980 + 980 = 2960 \text{ Вт} \approx 3 \text{ кВт},$$

$$Q = \sum Q_\phi = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = 0 + 980 + 980 = 1960 \text{ Вар} \approx 2 \text{ кВар},$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2960^2 + 1960^2} = 3550 \text{ Вт} \approx 3,6 \text{ кВА}$$

б) Розрахунок мережі за аварійних умов роботи.

Схема заміщення електричного кола при згорянні запобіжника у фазі С буде мати вигляд приведений на рис.2 до задачі 4.24:

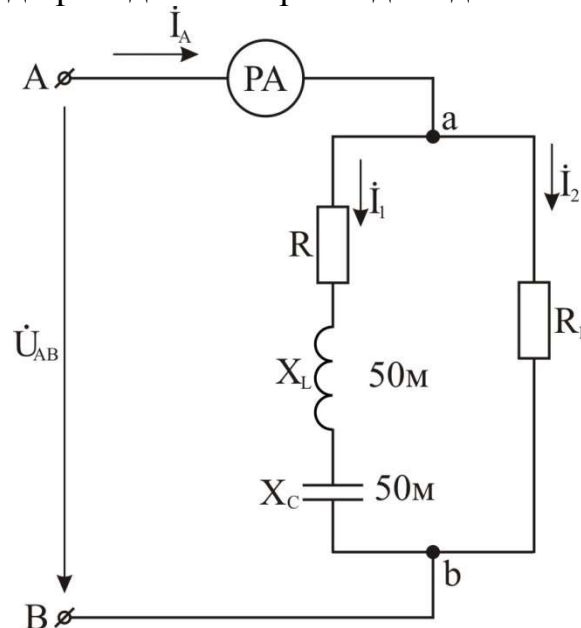


Рис. 2 до прикладу 4.24

Опори у лівій паралельній вітці ab будуть:

– активний $R = R_2 + R_3 = 5 + 5 = 10 \text{ Ом}$,

– індуктивний $X_L = j5 \text{ Ом}$,

– ємнісний $X_C = -j5 \text{ Ом}$,

– у правій паралельній вітці – активний $R_1 = 10 \text{ Ом}$.

Розв'язання.

1. Визначаємо опори окремих віток схеми.

$$Z_1 = R + j(X_L - X_C);$$

$$Z_1 = Z \cdot e^{j\alpha_1} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \cdot e^{j\alpha_1};$$

$$Z_1 = \sqrt{10^2 + (5 - 5)^2} = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_1 = 10 \cdot e^{j0} = 10 \text{ Ом},$$

$$\text{де } \alpha = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{5 - 5}{10} = \arctg \frac{0}{10} = 0$$

$$Z_2 = R_1 \cdot e^{j0} = R_1 = 10 \text{ Ом}.$$

Загальний опір кола.

$$Z_{\text{заг.}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \text{ Ом}.$$

2. Струми у колі:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_1} = \frac{100}{10} = 10 \text{ А};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_2} = \frac{100}{10} = 10 \text{ А};$$

$$\dot{I} = \dot{I}_I = 10 + 10 = 20 \text{ А}$$

$$\text{або } \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{\text{заг.}}} = \frac{100}{5} = 20 \text{ А}.$$

Амперметр покаже діюче значення струму 20 А .

Як видно із розрахунків, у колі діють тільки активні струми за рахунок резонансу напруги у лівій паралельній вітці схеми, що виникає внаслідок послідовного з'єднання реактивних опорів однакової величини $X_L = X_C$.

У разі обриву фази C трифазна мережа, завдяки рівнозначності реактивних опорів, перетворилася у схему з простим паралельним

з'єднанням двох активних опорів R і R_1 також рівнозначних за величиною.

За першим законом Кірхгофа загальний струм у лінії дорівнює сумі струмів двох паралельних віток.

3. Потужність, що споживається колом буде тільки активною.

$$P = I_L^2 \cdot Z_{\text{заг.}} = 20^2 \cdot 5 = 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт},$$

$$\text{або } P_1 = I_1^2 \cdot Z_1 = 10^2 \cdot 10 = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт},$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot Z_2 = 10^2 \cdot 10 = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт}.$$

Приклад 4.25. Обмотки фаз трифазного асинхронного двигуна із номінальною потужністю на валу $P_{2\text{НОМ}} = 4 \text{ кВт}$ увімкнені в трифазне живильне коло із лінійною напругою $U_L = 220 \text{ В}$ трикутником. Коефіцієнт потужності двигуна $\cos \varphi_\phi = 0,8$ ($\varphi = 37^\circ$); ККД $\eta = 0,85$. Визначити лінійні I_L і фазні I_ϕ струми електродвигуна і побудувати векторну діаграму напруг і струмів, знайти, яку реактивну потужність споживає двигун при номінальному навантаженні.

Розв'язання.

1. Потужність, що споживає електродвигун із мережі:

$$P = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta} = \frac{4 \cdot 10^3}{0,85} = 4700 \text{ Вт} = 4,7 \text{ кВт}.$$

2. Струми двигуна:

$$\text{лінійний: } I_L = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_L \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{4700}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,8 \cdot 0,85} = 18 \text{ А},$$

$$\text{фазний: } I_\phi = I_L / \sqrt{3} = \frac{18}{1,73} = 10,5 \text{ А}.$$

3. Опір фази двигуна при заданому навантаженні на валу:

$$\text{повний: } Z_\phi = \frac{U_\phi}{I_\phi} = \frac{U_L}{I_\phi} = \frac{220}{10,5} = 21 \text{ Ом};$$

$$\text{активний } R_\phi = Z_\phi \cos \varphi_\phi = 21 \cdot 0,8 = 16,8 \text{ Ом}.$$

4. Реактивну потужність, що споживає двигун, при номінальному навантаженні

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L I_L \sin \varphi_\phi = 1,73 \cdot 220 \cdot 18 \cdot 0,6 = 4110 \text{ вар} \approx 4,1 \text{ квар}.$$

Зверніть увагу!

Асинхронний двигун споживає для утворення магнітного поля стільки реактивної енергії, скільки знімається з його вала активної (корисної) потужності.

5. Векторна діаграма струмів і напруг для кола, що розглядається побудована на рис.1 до задачі 4.25.

$$m_U = \frac{20B}{\text{см}}; m_I = \frac{5A}{\text{см}}.$$

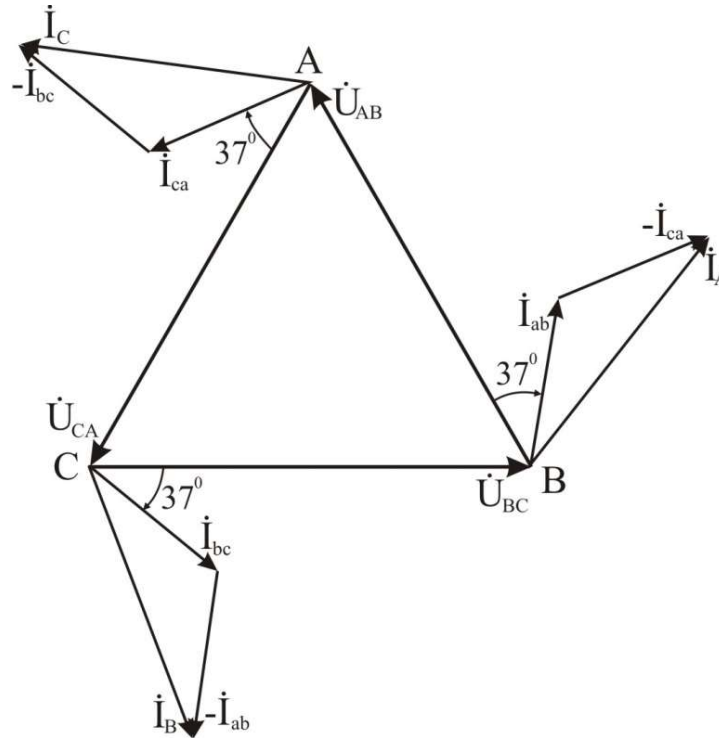


Рис. 1 до задачі 4.25. Векторна діаграма струмів і напруг

Поміркувати: Як зміниться потужність двигуна якщо обмотки фаз двигуна перемкнуті із трикутника в зірку?

4.3.8. Пожежна небезпека мереж змінного струму та протипожежні заходи

На початку XXI ст. виробництво, розподіл і споживання електричної енергії відбувається на 99 % змінним струмом. Перетворення електричної енергії в інші види енергії на виробництві і в побуті здійснюється електротепловими, електромеханічними та електрохімічними перетворювачами. Не випадково одною із основних причин пожеж у побуті і на виробництві в більшості економічно розвинених країнах являється несправність електрообладнання, що споживає змінний (в основному трифазний) струм. Частка пожеж, що виникають з цієї причини, склала в кінці XX ст. у розвинених країнах, в тому числі й на Україні, приблизно 24 % від загальної кількості пожеж (це друга основна причина виникнення пожеж після необережного поводження з вогнем). При цьому 40 % пожеж від електроустановок

приходяться на силові та освітлювальні електричні мережі, 15 % – на складну електротехнічну і електронну техніку [1].

Як уже відмічалось раніше в розділах 1 і 2, основними причинами виникнення пожеж в електричних мережах і електроустановках є короткі замикання (КЗ), струмові перевантаження та великі перехідні опори контактних з'єднань струмоведучих проводів які в основному виникають через несправність і неправильну експлуатацію електроустановок і пристроїв. В більшості випадків пожежі відбуваються в результаті перегріву і займання ізоляції, спалимих речовин і матеріалів, що знаходяться в безпосередній близькості до електрообладнання, струмових провідників і електричних машин, до місць великих перехідних опорів і т.п.

У трифазних системах розрізняють такі основні види коротких замикань: однофазне, двофазне, двофазне на землю (замикання двох фаз між собою з одночасним замиканням тієї ж точки на землю) і трифазне (рис. 4.40).

Нагадаємо. Коротким замиканням називається аварійний режим, що утворюється внаслідок порушення (пошкодження) ізоляції струмоведучих елементів мережі. В місці пошкодження чи руйнування ізоляції відбувається з'єднання фаз мережі між собою, на нейтральний провід або на землю.

Мережа, в якій нейтральний провід джерела постачання з'єднуються з землею (через заземлювачі) називають мережею з глухо заземленою нейтраллю (див. рис. 4.40,а). В ній можливі міжфазні і однофазні КЗ.

Режим однофазного КЗ утворюється, якщо порушується ізоляція між якою-небудь фазою і землею або нульовим проводом (рис. 4.40,а). В мережах напругою 380/220 В такі КЗ складають приблизно 65% загальної кількості замикань.

Багатостатні післядії КЗ. Різке збільшення у короткозамкненому колі струму відповідно призводить до збільшення в квадратичній залежності термічної і динамічної його дії. Так, наприклад, якщо струм КЗ порівняно з нормальним режимом виріс в 10 разів, то електродинамічні зусилля між струмоведучими частинами і виділення теплоти в них збільшиться в 100 разів.

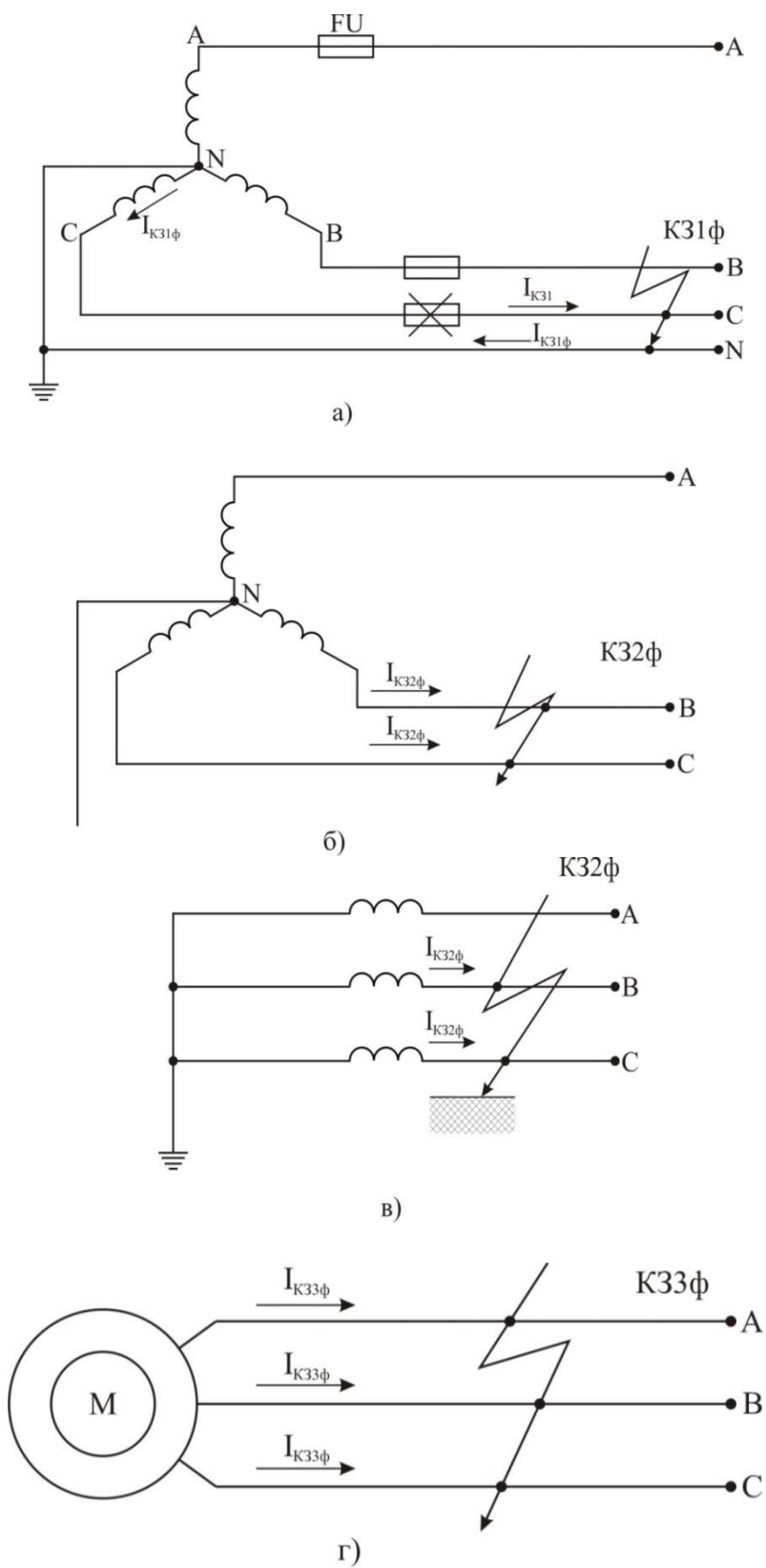


Рис. 4.40. Виды коротких замыканий:
а) – однофазные; б) – двухфазные; в) – двухфазные на землю;
г) – трехфазные

Однофазні КЗ можуть утворювати так звані неповнофазні режими (коли у трифазному колі перегоряє запобіжник в одній із фаз (рис. 4.40, а), або при обриві одного проводу, або порушенні контакту одного із полюсів магнітного пускача чи автомата). Такі режими дуже небезпечні для трифазних двигунів. Неповнофазний режим утворюється, найчастіше після перегорання в одній фазі запобіжника, який спрацював вимикаючи однофазне КЗ. Через це основним заходом що запобігає неповнофазні режими роботи електродвигунів, слід вважати використання трифазних захисних апаратів (автоматів) у силових колах. Якщо між виводами джерела живлення (наприклад, трансформатора) і затискачами електродвигуна використовуються тільки трифазні захисні апарати, то вимикання однофазного КЗ, що виникло в мережі, яка з'єднує джерело з електродвигуном, відбувається у всіх трьох фазах. Інакше кажучи, при спрацюванні трифазних апаратів захисту неповнофазний режим не утворюється.

При двофазному замиканні (рис. 4.40, б) дві фази з'єднуються між собою без контакту між землею.

За двофазним замиканням на землю (рис. 4.40, в) фази з'єднуються між собою через землю. В системах з ізолюваною нейтраллю це замикання аналогічно простому двофазному.

За трифазним замиканням (рис. 4.40, г) всі три фази з'єднуються між собою. Трифазні КЗ виникають значно рідше інших (біля 10 %). Проте, як свідчить практика, трифазні КЗ викликають більш тяжкі після дії, а тому найбільш небезпечні. Наприклад, при трифазному КЗ на шинах напругою силової підстанції 380/220 В він складає від 25 до 40 кА, а на шинах щитових зборок та шаф – 3,5 – 10 кА, на клеммах двигунів середньої потужності до 10 кВт – до 2 кА. Отже, при КЗ величини струмів, що протікають по провідниках і струмопровідних частинах апаратів і машин, досягають дуже великих значень і утворюють великі електродинамічні сили, які руйнують електричні ізоляційні та металеві підтримуючі конструкції, а теплова дія дуги, що виникає при КЗ, плавить металеві конструкції, які в прямому значенні цих слів займаються і горять.

КЗ на затискачах металопотужних струмоприймачів, наприклад, електродвигунів – це миттєвий спалах з великою кількістю розплавлених частинок металу, що розлітаються навколо місця КЗ.

Таким чином, під час КЗ джерелами запалювання є електрична дуга, бризки розплавленого металу та сам нагрітий провід. Від цих джерел запалювання займається горюча ізоляція та інші деталі й конструкції електроустановок, а також навколишнє середовище.

Співвідношення між силами струму КЗ одно-, дво- та трифазних замикань у загальному вигляді таке:

$$I_{КЗ}^3 > I_{КЗ}^2 > I_{КЗ}^1.$$

Величина сили струму I_{K3} залежить від потужності джерела, що живить коло короткого замикання, відстані електроустановок і пристроїв від місця КЗ (тобто від опору електричного кола) виду КЗ і тривалості його (часу із моменту виникнення до вимикання джерела струму апаратом захисту).

Зі збільшенням потужності електроустановок і пристроїв збільшується і сила струму КЗ, а при збільшенні відстані місця короткого замикання від джерела живлення величина I_{K3} зменшується за рахунок збільшення опору елементів кола. Правильне налагодження і використання швидкодіючих апаратів захисту не дозволяє струмам досягнути максимальних значень при короткому замиканні. Але, як показує практика, у виробничих приміщеннях з підвищеною вологістю повітря, або при наявності дисперсного пилу КЗ виникають при найнепередбачених умовах і ситуаціях. Отже, найбільш ефективними заходами запобігання КЗ є своєчасний і регулярний профілактичний огляд і ремонт електрообладнання та перевірка стану ізоляції струмовідних частин. Опір ізоляції струмоведучих частин повинен бути в мережах 380/220 В не менше 0,5 МОм.

Слід також відмітити, що крім термічного і електродинамічного ефектів при КЗ відбувається різкий спад напруги в електричних мережах, котра може стати причиною часткового або повного порушення електропостачання споживачів.

Якщо спад напруги в мережі (в момент КЗ) невеликий і джерело живлення не вимкнулось апаратами захисту, то електродвигуни будуть продовжувати працювати, але з меншою частотою обертання. При значному зниженні напруги обертовий момент двигуна може виявитися недостатнім, щоб обертати навантаження, і він зупиниться (перейде в режим пуску або в режим КЗ).

На деяких виробництвах зменшення частоти обертання електродвигунів або їх зупинка може привести до порушення всього технологічного процесу, псування продукції, пожежі або вибуху.

Так, наприклад, на нафтопереробних заводах, хімічних підприємствах що виробляють мінеральні добрива, й інших підприємствах багато процесів пов'язано з інтенсивним охолодженням проміжного або кінцевого продукту. Зупинка електродвигунів насосів або зменшення їх частоти обертання може привести до припинення або зменшення подачі холодоагенту в теплообмінні апарати. Внаслідок цього температура і, відповідно, тиск в середині установки різко збільшується, що може привести до вибуху і пожежі.

І на завершення ще раз відмітимо, що попередження КЗ забезпечується правильним проектуванням якісним спорудженням і

технічнограмотною експлуатацією електроустановок (див. також розділ 1. п.1.14.1).

Другим не менш небезпечним явищем виникнення пожеж в електричних мережах і установках напругою 380/220В є струмові перевантаження.

Розрізняють перевантаження нормальні та аварійні. Перші виникають в процесі нормальної експлуатації електроустановок трифазного струму і не приводять до небезпечних післядій. Такого роду перевантаження, наприклад, є пускові струми асинхронних двигунів. Аварійні перевантаження виникають з різних причин (див. також розд.1. п.1.16.2). Найбільш розповсюдженою причиною – підключення нових непередбачених навантажень призводять до збільшення струму на окремих ділянках кола поверх допустимого, а також перевантаження двигунів за технологічним режимом (рідше аварійних).

Ще одна причина перевантажень, що спостерігається на практиці – неправильне виконання захисту від КЗ і перевантажень. Загрублення захисту, використання захисних апаратів які не реагують на струми КЗ в мережі, установка в запобіжниках некаліброваних плавких вставок, а іноді простих дротяних перемичок приводять до відмови захисту при виникненні в мережі КЗ, особливо однофазних, за яких струми іноді не дуже перебільшують робочі. Тривало протікаючи, вони утворюють небезпечні перевантаження для струмоприймачів.

Отже, для запобігання перевантажень, крім дотримання вимог ПБЕ [30] та інших нормативно-технічних документів щодо улаштування і вибору елементів електричних кіл та мереж необхідний постійний контроль струмових навантажень. Він може бути постійним або тимчасовим, перевірочним. Постійний контроль здійснюється контрольними-вимірювальними приладами, що змонтовані на панелях розподільчих щитів. У міру необхідності величину струму можна виміряти за допомогою струмовимірювальних кліщів, або ж за допомогою розрахунків якщо відомі величини елементів, по яких протікає струм.

У разі виявлення перевантажень необхідно терміново приймати відповідні заходи щодо розвантаження електроустановки чи мережі до номінальних значень струмів і напруг.

Запитання та завдання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте періодичні функції часу та яким чином отримують синусоїдальні функції струму, ЕРС, напруги?
2. Поясніть графічне та векторне зображення синусоїдальних величин і якими параметрами вони характеризуються?
3. В чому полягає різниця між миттєвим та діючим значенням синусоїдальних величин струму, ЕРС, напруги?
4. Відомі миттєві значення струмів у трьох паралельних вітках:

$$i_1=9\sin(10t+30^\circ);$$

$$i_2=4\sin(10t+60^\circ);$$

$$i_3=6\sin(10t+150^\circ).$$

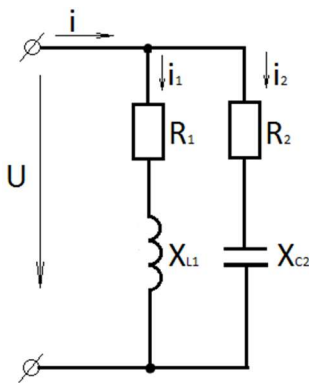
Користуючись векторною діаграмою, визначити амплітудне та діюче значення струму й у нерозгалуженій частині кола, а також записати в загальному вигляді його миттєве значення.

Відповіді: $I_m=5A$, $i=3.53A$, $i=5\sin(\omega t+23^\circ)$.

5. Поясніть фізичну суть розрахункових величин X_L та X_C .
6. Якими співвідношеннями характеризується коло синусоїдального струму з послідовно з'єднаних R, L, C елементів.
7. Вкажіть особливості розрахунків синусоїдального кола з паралельним з'єднанням елементів R, R-L, R-C. Та побудови векторних діаграм.
8. За яких умов виникає резонанс струмів і які співвідношення електричних величин у цих режимах?
9. Чому дорівнює запас енергії в реактивних елементах L і C при резонансі напруг?
10. Якими потужностями характеризуються електричні кола синусоїдального струму, що утворюють: активний опір R, реактивний опір X_L та реактивний опір X_C .
11. Обґрунтуйте практичне значення параметра $\cos\phi$ та приведіть приклади його підвищення.
12. Як визначити загальний $\cos\phi$ кола, що складається із декількох паралельних віток, якщо відомі активні і реактивні потужності кожної вітки?
13. Як змінюється величина струму в нерозгалуженій частині кола, якщо паралельно котушці ввімкнути конденсатор? Розглядати три випадки: 1) $b_c > b_l$; 2) $b_c < b_l$; 3) $b_c = b_l$.
14. Що таке символічний (комплексний) розрахунок кіл синусоїдального струму та форми запису комплексного числа?
15. За яких діянь над комплексними величинами зручно користуватися тою чи іншою формою запису комплексних чисел?

16. Комплексний опір дорівнює $(8+j6)$ Ом. Визначити активну та реактивну провідності. Відповіді: $q=0.08\text{См}$, $b_1=0.06\text{См}$.

17. До мережі живлення напругою 220 В приєднані два споживача.



Перший з них споживає встановлений струм, а другий – випереджуючий струм. Визначити: 1) струм кожного приймача i_1 , i_2 ; загальний струм i , активні і реактивні потужності, якщо $R_1=8$ Ом; $X_{L1}=6$ Ом; $R_2=3$ Ом; $X_{C2}=4$ Ом. Задачу розв’язати комплексним методом.

Відповіді: $I_1=20$ А; $P_1=3200$ Вт; $Q_1=2400$ вар; $S_1=4000$ ВА; $I_2=40$ А; $P_2=4800$ Вт; $Q_2=6400$ вар; $S_2=8000$ ВА; $I=44.7$ А; $P=8000$ Вт; $Q=4000$ вар; $S=8940$ ВА;

18. Що таке трифазне коло та отримання трифазної системи ЕРС?

19. Способи зєднання фаз трифазного джерела? Поняття про лінійні та фазні напруги.

20. В яких випадках на практиці використовується три провідна та чотири провідна системи трифазного струму? Приведіть приклади.

21. Поясніть способи зєднання фаз трифазного кола зіркою і трикутником, напишіть співвідношення між їх лінійними та фазними напругами і струмами.

22. В чотири провідну систему трифазного струму з лінійною напругою $U_{\text{л}}=220$ В ввімкнені зіркою три групи ламп із опорами $R_A=10$ Ом,

$R_B=5$ Ом, $R_C=7,5$ Ом. Визначити: 1) лінійні струми I_A , I_B , I_C ; 2) активну потужність трифазної системи P ; 3) струм в нульовому проводі I_N .

Відповідь: $I_A=12.7$ А, $I_B=25.4$ А, $I_C=16.9$ А, $P_A=1613$ Вт, $P_B=3227$ Вт, $P_C=2150$ Вт, $P=7$ кВт.

Для визначення I_N побудувати векторну діаграму і складання векторних діаграму і складання векторних величин струмів одержимо $I_N=10.8$ А.

23. Поясніть значення коефіцієнта потужності та способи його підвищення.

РОЗДІЛ 5. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ.

5.1. Загальні відомості про перехідні процеси в електричних колах лінійні електричні кола.

Електричні кола складаються із активних і пасивних елементів. Активними елементами вважаються джерела електричної енергії (джерела напруги і струму), до пасивних елементів відносяться резистори, котушки індуктивності, електронні конденсатори. Кількісні характеристики елементів електричного кола називаються її параметрами. Наприклад, параметрами джерела постійної напруги являються його ЕРС і внутрішній опір. Параметри резистора служать його внутрішній опір R , котушки – її індуктивність L і конденсатора – ємність C .

Напруга або струм що підводяться до кола, будемо називати впливовим або вхідним сигналом. Напруги і струми, що виникають під дією зовнішнього впливового сигналу в зацікавленій частині електронного кола будемо називати реакцією (відгуком) кола або вихідним сигналом.

Будь який пасивний елемент реального електричного кола в тій чи іншій мірі володіє активним опором, індуктивністю і ємністю. Однак, щоб полегшити вивчення процесів в елементарному колі і його розрахунок, реальне коло замінюється ідеалізованим, що складається із окремих просторово розділених елементів R , L , C . При цьому вважається, що провідники, що з'єднують елементи кола не володіють активним опором, індуктивністю і ємністю. Таке ідеалізоване коло називається колом із зосередженими параметрами і засновані на ньому розрахунки дають в більшості випадків результати, що підтверджуються досвідом.

В цьому розділі розглядаються кола із постійними параметрами, тобто такі кола, у яких опори резисторів R , індуктивність котушок L і ємність конденсаторів C являються постійними, не залежними від діючих в колі струмів і напруг. Такі елементи називаються лінійними.

Якщо опір резистора R не залежить від струму то лінійна залежність між спадом напруги і струмом виражається законом Ома $u_R = R \cdot I_R$, а вольт-амперна характеристика резистора являє собою пряму лінію (рис. 5.1а). Якщо індуктивність котушки L не залежить від величини протікаючого в ній струму, то потокозчепленні в ній самоіндукції котушки $\psi = L I$ (рис. 5.1,б). На кінець, якщо ємність конденсатора C не залежить від прикладеної до об'єкта напруги u_C пов'язані між собою лінійною залежністю $q = C u_C$, графічно показаної на рис. 5.1,в.

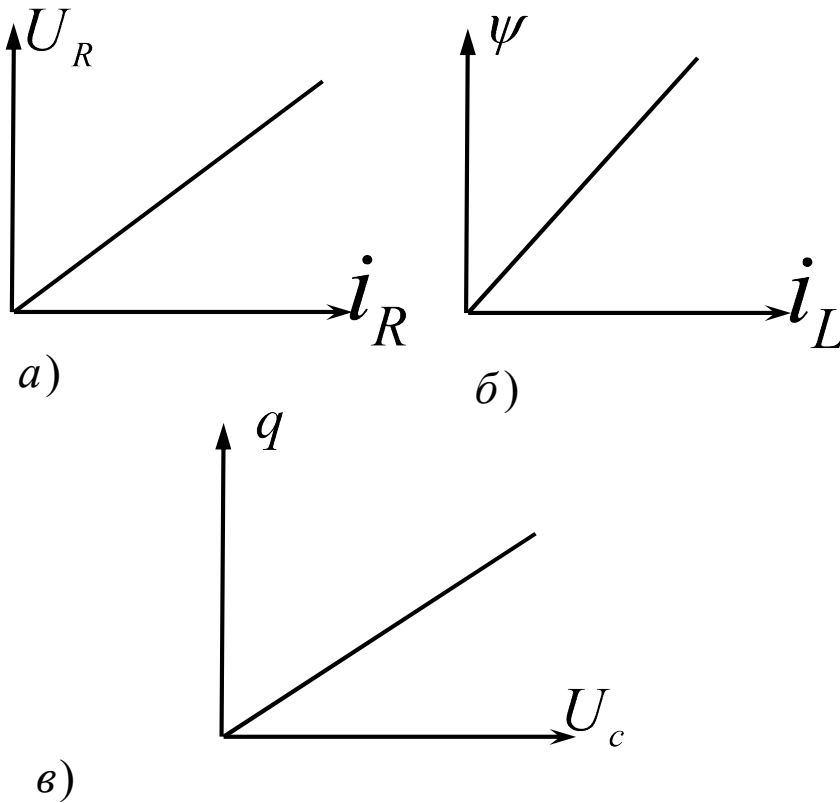


Рис. 5.1. Характеристики лінійних елементів електричного кола.

а – вольт-амперна характеристика резистора;

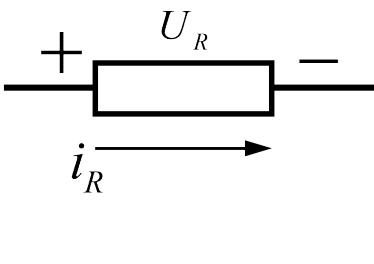
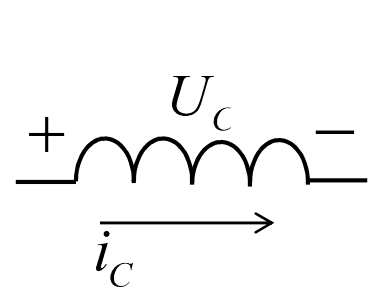
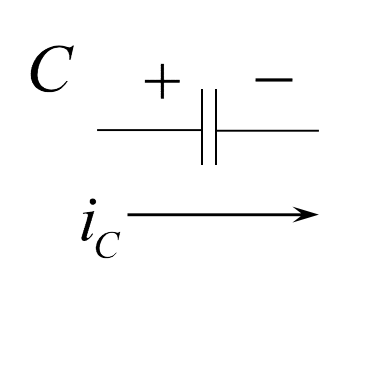
б – залежність потокозчеплення від струму в котушці;

в – залежність заряду конденсатора від напруги на ньому.

Лінійність опору індуктивності і ємності носить умовний характер, так як насправді всі реальні елементи електричного кола являються нелінійними. Так, при проходженні струму через резистор останній нагрівається і його опір змінюється. Надмірне збільшення струму в котушці з феромагнітним осердям може дещо змінити її індуктивність. В тій чи іншій мірі змінюється ємність конденсаторів з різними діелектриками в залежності від прикладної напруги. Проте в нормальному робочому режимі елементів ці зміни зазвичай настільки незначні, що для розрахунків можуть не прийнятися до уваги.

Транзистори, напівпровідникові прилади діоди, тиристори і інші, що працюють в режимах, коли використовуються прямолінійні ділянки їх вольт-амперних характеристик, також умовно можуть розглядатися як лінійні пристрої.

В таблиці 5.1. приведені співвідношення між миттєвими значеннями напруги і струму для елементів R, L, C, причому функції часу напруги і струму та енергія для елементів R, L, C.

Елемент кола	Спад напруги	Струм	Енергія
	$U_R = Ri_R$	$i_R = \frac{U_R}{R}$	$W = Pt$
	$U_L = L \frac{di_L}{dt}$	$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t U_L dt + i_L(0)$	<p>Енергія магнітного поля</p> $W_M = \frac{Li^2}{2} = \frac{\psi_L^2}{2L}$
	$U_C = \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt + U_C(0)$	$i_C = C \frac{dU_C}{dt}$	<p>Енергія електричного поля</p> $W_E = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{q_C^2}{2C}$

Струм i_c , що проходить через конденсатор визначається швидкістю зміни напруги du_c/dt яка виділяється на ньому. Позначені стрілкою напрям струму i_c і полярність напруги u_c відповідає зростанню напруги у конденсаторі, тобто його зарядженню в указаному напрямі (похідна du_c/dt позитивна).

Якщо i_L і u_c зменшуються (похідні негативні), то полярність напруги u_L і напрямок струму i_c повинен бути змінений на зворотні.

Електричне коло, що складається із лінійних елементів називається лінійним електричним колом. Процеси в таких колах описуються лінійними алгебраїчними або лінійними рівняннями.

Для аналізу перехідних процесів в лінійних електричних колах використовуються закони Кірхгофа (див. розділ 2 п.2.2.4).

Електричні кола, що складаються із резисторів і котушок індуктивності, в подальшому називаються RL колами, кола, що складаються із резисторів і конденсаторів, - RC колами і накінець, кола, що складаються із резисторів, котушок і конденсаторів, - RLC колами.

В наступних підрозділах розглядаються тільки лінійні кола з зосередженими параметрами.

5.2. Усталений рух і перехідний режим електричного кола.

Для аналізу процесів в електричних колах доводиться зустрічатися з двома режимами роботи: усталеним (стаціонарним) і перехідним.

Усталеним режимом електричного кола, підключеного до джерела постійної напруги (струму), називається режим при якому струми і напруги в окремих гілках кола незмінні в часі.

В колі, підключеному до джерела змінного струму, усталений режим характеризується періодичним повторенням миттєвих значень струмів і напруг у гілках. Так, наприклад, якщо коло підключене до джерела ЕРС синусоїдальної форми, частотою ω , то струм (напруга) влюбій гілці кола має синусоїдальну форму, постійну амплітуду і змінюється з частотою ω . Саме для такого режиму ми маємо право говорити, що індуктивний опір котушки змінному струму дорівнює ωL , а ємнісний опір конденсатора дорівнює $\frac{1}{\omega C}$.

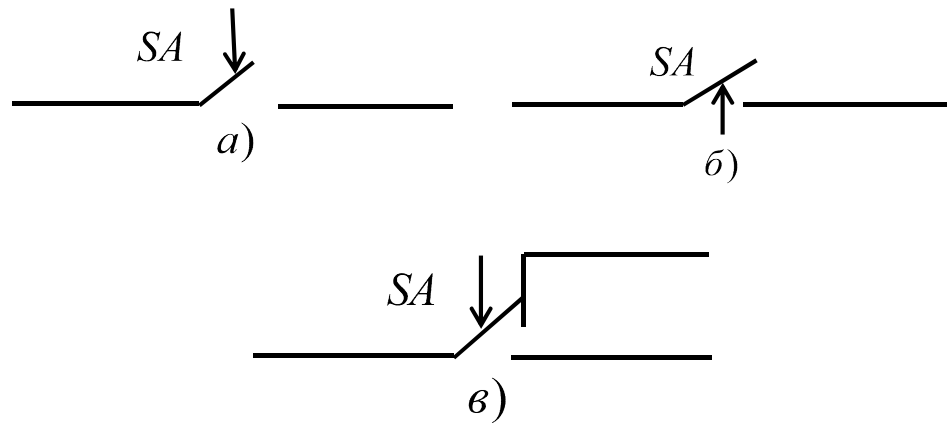
В усіх випадках роботи кіл в усталених режимах, які теоретично можуть продовжуватись необмежено довгий час, передбачається, що параметри впливаючого сигналу (напруги або струму), а також структура кола і параметри її елементів не змінюються. Струми і напруги усталеного режиму залежать від виду зовнішнього впливу і від параметрів електричного кола.

Прийнято також вважати, що в усталеному режимі знаходиться електричне коло, що відключене від джерела електричної енергії, тобто коло, у гілках якого немає струмів.

Перехідним режимом (або перехідним процесом) називається режим, виникаючий в електричному колі під час переходу від одного стаціонарного стану до другого який чим-небудь відрізняється від попереднього, а супутні цьому режиму напруги і струми – перехідними напругами і струмами. Зміни стаціонарного (усталеного) режиму кола може відбуватися в результаті зміни зовнішніх сигналів, в тому числі вмикання або вимикання джерела зовнішнього впливу, або може бути викликане перемиканням всередині самого кола.

В загальному випадку в електричному колі перехідні процеси можуть виникати тільки тоді, коли в колі маються індуктивні і ємнісні елементи.

Будь-яка зміна в електричному колі, що приводить до виникнення перехідного процесу домовимося називати комутацією. В більшості випадків теоретично допустимо вважати, що тривалість комутації порівняно з тривалістю перехідного процесу дуже мала. У цих випадках можна вважати, що комутація здійснюється миттєво, тобто різні перемикання в колі відбуваються без витрати часу, і тривалість комутації Δt дорівнює нулю $\Delta t=0$. Процес комутації на схемах умовно показується стрілкою біля вимикача SA (рис. 5.2.)



**Рис. 5.2. Умовне зображення процесу комутації:
а) вмикання, б) розмикання, в) перемикання.**

Перехідні процеси в реальних колах являються швидкоплинними, тривалість їх складає десятки соті, а часто й мільйонні частки секунди. Порівняно рідко тривалість цих процесів досягає одиниці секунди.

Природно виникає питання чи треба взагалі брати до уваги перехідні режими, що мають настільки коротку тривалість? Відповідь може бути дана тільки для кожного конкретного випадку, так як в різних умовах їх роль не однакова. Особливо велике їх значення в пристроях електроніки, призначених для підсилення, формування і перетворення імпульсних сигналів, коли тривалість на електричне коло сигналів порівнянна з тривалістю перехідних режимів.

В електричних і електромеханічних системах без урахування зміни в часі та за величиною електричних параметрів кола, під час перехідних процесів взагалі неможливо правильно визначити і розрахувати електричні навантаження мереж і струмоприймачів, правильно вибрати апарати електричного захисту та їх захисні параметри, забезпечити стабільну роботу високовольтних ліній електропередавання і синхронних генераторів електростанцій.

Перехідні процеси в електромеханічних системах – потужних електроприводах можуть бути викликані всякого роду аварійними режимами або порушенням нормальних умов електропостачання, наприклад коливанням напруги частоти в живильній мережі, обривом одної із трьох фаз тощо. До перехідних процесів в приводних двигунах відносяться також пуск, уповільнення ходу (гальмування) або зупинка, реверсування обертання, поштовх навантаження або скидання його і т.д.

Розрахунок і аналіз пристроїв автоматики, наприклад, верстатів з програмним керуванням де відбувається безперервна зміна стану параметрів електричних кіл, немислимий без урахування перехідних процесів.

Взагалі перехідна процеси мають широке розповсюдження в оточуючому нас світі – не тільки в усіх областях техніки, але і в природі і в суспільстві. Наприклад, землетруси, бурі та шквали, зміна однієї соціально-економічної формації на іншу (прикладі: розвал Радянського Союзу, революції в Югославії, Сирії, Ірані, Єгипті..., майдан в 2014 р. в Україні і т.д.). – Всі ці події являються сильно вираженими перехідними процесами в природі і суспільстві.

В деяких випадках як технічних системах так і в суспільстві, в принципі небажано і небезпечно. Розрахунок перехідних режимів в таких випадках дозволяє визначити можливі перенапруги збільшення струмів, які у багато разів можуть перевищувати напруг і струм стаціонарного режиму це особливо важливо для кіл із значною індуктивністю або великою ємністю.

5.3. Принципи виникнення перехідних процесів комутації.

Розглянемо з якісної точки зору явища, що виникають в електричних колах під час переходу від одного усталеного режиму до другого. Звернемося до відомих дослідів і розглянемо, як встановлюється стаціонарний режим електричних кіл, схеми яких показані на рисунку 5.3.

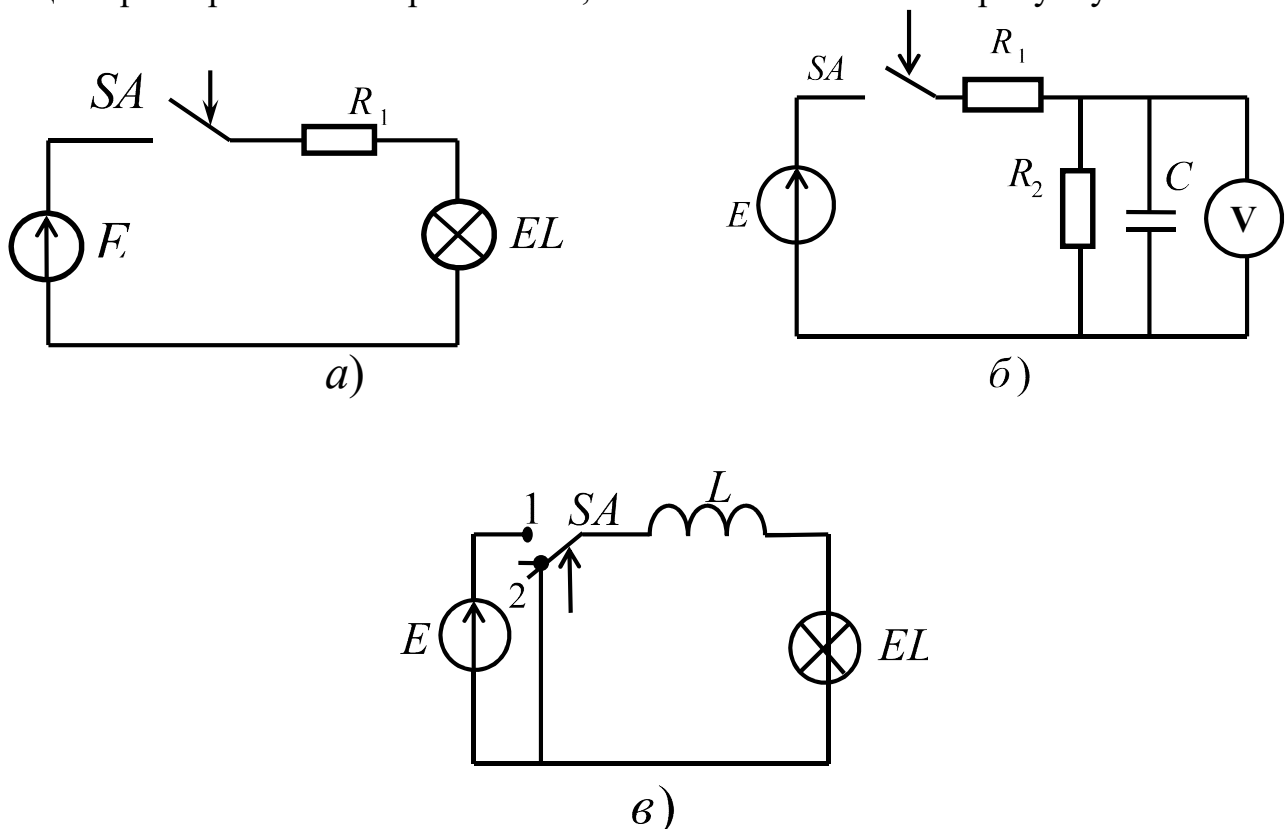


Рис. 5.3. Схеми кіл для ілюстрації перехідних процесів. а – коло без реактивних елементів; б – коло з котушкою індуктивності; в – коло з конденсатором.

Включимо лампу розжарювання EL в послідовне коло що отримує резистор R_1 , вимикач SA і джерело постійної напруги E (рис.5.3.а). Після замикання вимикача лампа відразу ж загориться. В електричному колі з резистивними (активними) елементами енергія електромагнітного поля не згасається, внаслідок чого в них перехідні процеси не виникають, тобто в таких колах миттєво, стрибком, встановлюється стаціонарні режими, а струм у колі за величиною буде $I_0 = \frac{E}{(R_1 + R_L)}$, де R_L – активний опір розжареної нитки лампи, EL .

Замінімо резистор катушкою L , індуктивність якої досить велика. Після замикання вимикача SA можна помітити, що наростання яскравості відбувається поступово. Це свідчить про те, що через наявність котушки струм у колі поступово досягає свого усталеного значення $I'_0 = \frac{E}{(r_k + R_L)}$, де r_k – активний опір обмотки котушки (рис. 5.3,б).

Наступний дослід проведемо з колом, що утримує джерело постійного струму, резисторів R_1 R_2 і конденсатора C , паралельно якому підключений вольтметр (рис.5.3,б). Якщо ємність конденсатора досить велика (декілька десятків мікрофарад), а опір кожного із резисторів R_1 і R_2 декілька сотень кілоом, то після включення вимикача SA стрілка вольтметра починає плавно відхилятися і тільки через декілька секунд встановлюється на відповідній поділці шкали. Отже, напруга на конденсаторі, а також струм в колі встановлюється протягом відносно тривалого проміжку часу (інерційністю самого вимірювального приладу в даному випадку можна нехтувати).

Що ж перешкоджає миттєвому встановленню стаціонарного режиму у кола (рис.5.3,б,в) і служить причиною виникнення перехідного процесу? Причиною цьому являються елементи електричних тіл, здатність запасати енергію, так звані реактивні елементи: котушка індуктивності (рис.5.3,б) і конденсатор (рис.5.3,в).

Виникнення перехідних процесів пов'язано з особливостями зміни запасу енергії в реактивних елементах кола. Кількість енергії, що накопичується у магнітному колі котушки з індуктивністю L , в якій протікає струм i_L , виражається формулою

$$W_L = \frac{1}{2} L i_L^2 . \quad (5.1)$$

Енергія, що накопичується в електричному полі конденсатора ємністю C , зарядженого до напруги u_c , рівна:

$$W_c = \frac{1}{2} C u_c^2 . \quad (5.2)$$

Кількість енергії W_L , як і енергії W_c не може змінитися в часі стрибком. Справедливість цього положення легко доказати слідуючим міркуванням. Припустимо, наприклад, що в колі рис.5.3,б за час комутації, яка, як ми домовилися вважати відбувається миттєво, тобто $\Delta t=0$, енергія

магнітного поля котушки зростає від 0 на деяку кінцеву величину ΔW_L . Потужність джерела P_0 (в даному випадку джерела постійної напруги), що віддає цю енергію, можна знайти, розділивши прирощення енергії на інтервал часу протягом якого це прирощення відбулося, тобто

$$P_0 = \frac{\Delta W_L}{\Delta t} = \frac{\Delta W_L}{0} = \infty.$$

Оскільки довготривалість комутації прийнята рівною нулю ($\Delta t=0$), та відношенню $\Delta W_L/\Delta t$ перетворюється в безкінечність, що неможливо, бо електричних тіл безкінечно великих потужностей в природі не існує і одержаний результат не має сенсу. Таким чином, збільшення запасу енергії магнітного поля котушки (рівно як і зменшення) може відбуватися тільки за кінцевий час, отже, припущення про можливість стрибкоподібної зміни величини W_L суперечить енергетичним відношенням і фізично нереально.

Шляхом аналогічних міркувань не важко прийти до висновку, що будь-яка зміна запасу енергії W_C в електричному полі конденсатора також не може відбуватися стрибком.

Із цього випливають два важливі правила. Оскільки запас магнітної енергії W_L визначається струмом в котушці i_L , а електричної енергії W_C – напругою на конденсаторі u_C , то у всіх електричних колах для любых комутаційних процесів дотримуються два основних положення: струм котушки і напруга на конденсаторі не можуть змінюватись стрибком. Іноді ці положення формулюються інакше, а саме: потокозчеплення котушки і заряд конденсатора можуть змінюватися тільки плавно, без стрибків.

Фізично перехідні режими являють собою процеси переходу енергетичного стану кола від докомутаційного до післякомутаційного режиму. Кожному стаціонарному стану кола, що має реактивні елементи, відповідає відповідний запас енергії електричного і магнітного полів. Перехід до нового стаціонарного режиму пов'язаний з наростанням або збуванням енергії цих полів і супроводжується виникненням перехідного процесу, який закінчується, як тільки припиняється зміна запасу енергії. Якщо під час комутації енергетичний стан кола не змінюється, то перехідні процеси не виникають.

Перехідні процеси виникають за наступуючих операцій:

- вмикання і вимикання кола;
- короткому замиканні окремих гілок або елементів кола;
- вимиканні або підмиканні гілок або елементів кола;
- за непередбачених стрибкоподібних змін навантажень тощо.

Для розглядання перехідних процесів зазвичай вважають, що комутація виникає в момент $t=0$, а отже, і початок перехідних процесів співпадає з цим моментом часу. Момент часу безпосередньо перед комутацією умовно позначимо $t(0_-)$, а момент часу безпосередньо після комутації - $t(0_+)$.

Скористаємося становищем про те, що струм в котушці і напруга на конденсаторі можуть змінюватися у часі тільки плавно без стрибків, і сформулюємо два важливих правила, які одержали назву законів комутації.

Перший закон комутації: струм в котушці індуктивності, що протікає в момент після комутації, дорівнює струму, що протікає в котушці в момент перед комутацією. Позначаючи ці струми відповідно символами $i_L(O_+)$ та $i_L(O_-)$, можна записати:

$$i_L(O_+) = i_L(O_-) \quad (5.3)$$

Другий закон комутації: напруга в конденсаторі в момент після комутації $u_c(O_+)$ дорівнює напрузі $u_c(O_-)$, яка була на початку на конденсаторі в момент перед комутацією. Математично це записується рівністю

$$u_c(O_+) = u_c(O_-) \quad (5.4)$$

Рівності (5.3) і (5.4) висловлюють початкові умови, що мають місце у колі під час комутації.

5.4. Початкові умови

Комутація може проводитися як в знеструмленому електронному колі (наприклад, первоначальне підключення кола до джерела енергії), так і в колі, що вже знаходиться під струмом (вимикання кола від джерела енергії, перемикання окремих гілок тощо). Якщо в момент, безпосередньо перед комутацією, струми в гілках електричного кола і напруга, на конденсаторах були рівні нулю, тобто ні один із реактивних елементів кола не володів запасом енергії $i_L(O_-) = 0$, $u_c(O_-) = 0$, то вважають, що в колі мають місце нульові початкові умови. Так наприклад під час першоначального підключення якого-небудь кола до джерела живлення в ньому виникає перехідний процес з нульовими початковими умовами, характер і тривалість якого визначається впливовим сигналом, структурою (схемою) кола і параметрами її елементів. За нульових початкових умов згідно законам комутації струм в котушці в перший момент після комутації $i_L(O_+) = 0$ і гілка електричного кола, куди ввімкнена котушка, виявляється як би розімкнутою; напруга на незарядженому конденсаторі в перший момент після комутації $u_c(O_+) = 0$ і конденсатор як би замикає накоротко ті вузли кола, між якими він включений.

Якщо в колі перед комутацією малися котушки, через які протікали струми $i_L(O_-) \neq 0$, або заряджені конденсатори $u_c(O_-) \neq 0$, тобто якщо в колі до моменту зміни його стану була запасена енергія у формі електричного або магнітного поля, обумовлена процесом, що відбувався до комутації, то вважають що у колі мають місце ненульові початкові умови. Перехідний режим у цьому разі, крім параметрів впливаючого сигналу і самого кола, залежить і від ненульових початкових умов. Знання початкових умов

обов'язкове для аналізу і розрахунків перехідного процесу, причому зовсім байдуже, яким способом ці початкові умови в колі були створені.

Згідно законам комутації за ненульових початкових умов в перший момент після комутації, тобто в момент $t(0_+)$, котушка рівносильна джерелу струму $i_L(0_-)$, а конденсатор – джерелу ЕРС $u_c(0_-)$. Таким чином, струм в котушці і напруга на конденсаторі почнуть змінюватися з тих значень, які вони мали безпосередньо до комутації.

Перехідні процеси з ненульовими початковими умовами виникають в електричних колах при слідуючих обставинах:

- розряді зарядженого конденсатора;
- шунтуванні, короткому замикання, відключенні елементів кола, під'єднанні до джерела енергії;
- відключенні джерела енергії без розривання кола;
- під час зміни параметрів впливаючого сигналу тощо.

У всіх приведених прикладах передбачається, що в момент комутації електричні кола знаходяться в усталеному режимі.

5.5. Властивості показникової функції.

Поняття про сталу часу.

Для аналізу перехідних процесів нам постійно буде зустрічатися деяка показникова функція часу, яка називається експоненціальною функцією (або коротко експонентною).

Експоненціально спадна (загасаюча) з плином часу функція $\alpha(t)$ математично записується так:

$$\alpha(t) = A * e^{-\alpha t}, \quad (5.5)$$

де A – стала, що визначає початкове значення функції, тобто значення $\alpha(t)$ в момент $t=0$; α – коефіцієнт загасання; t – час; $e \sim 2.72$ – число, що представляє собою основу натуральних логарифмів.

Показникова функція має область визначення за будь-яких (дійсних) значеннях змінної $t < 0$ і $t \geq 0$. Проте область визначення для експоненціальної функції що розглядається $\alpha(t)$ обмежимо значеннями часу $t \geq 0$ і будемо вважати її рівною нулю $\alpha(t) = 0$ за $t < 0$, оскільки всі, що нас цікавлять процеси в електричних колах мають місце при $t \geq 0$ (нагадаємо, що комутація у колі відбувається в момент $t = 0$).

Розглянемо деякі властивості експоненціальної функції $e^{-\alpha t}$.

Насамперед відмітимо, що

$$e^{-\alpha t} = \frac{1}{e^{\alpha t}}. \quad (5.6)$$

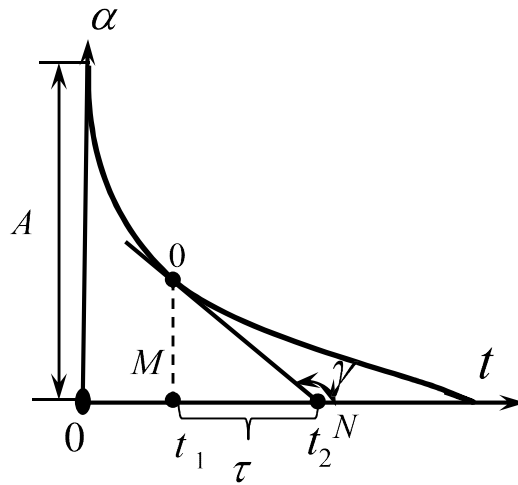
В початковий момент часу ($t = 0$)

$$e^{-\alpha t} = \frac{1}{e^0} = 1, \quad (5.7)$$

оскільки всяке число в нульовій степені дорівнює одиниці. Зі збільшенням t знаменник дроби $\frac{1}{e^{-at}}$ зростає і, отже, функція e^{-at} зменшується, причому за будь-яких $t \geq 0$ приймає тільки позитивні значення. За необмеженого зростання t ($t \rightarrow \infty$) значення функції e^{-at} прагне до нуля ($e^{-at} \rightarrow 0$).

Таким чином, під час зміни t від 0 до ∞ величина, функції e^{-at} монотонно зменшується від свого найбільшого значення рівного одиниці, до нуля і за $t \rightarrow \infty$. Чим більше значення α , тим швидше убуває функція e^{-at} , через це даний коефіцієнт називається коефіцієнтом загасання.

Графік, що якісно ілюструє зміну функції $\alpha(t)$, показаний на рис. 5.4.



Відмітимо на кривій довільну точку O , відповідну моменту часу t_1 , і проведемо в цій точці дотичну до перетину її з віссю абсцис в точці N . Кут, утворений дотичною з позитивним напрямком вісі абсцис, позначимо γ . Визначимо величину відрізка MN , який в математиці називають під дотичною. Із трикутника ONM знаходимо:

$$tg(180^\circ - \gamma) = -tg\gamma = \frac{OM}{MN},$$

Звідки

$$MN = -\frac{OM}{tg\gamma}.$$

Ордината OM визначає величину функції $\alpha(t)$ в момент t_1 і дорівнює:

$$OM = \alpha(t_1) = A * e^{-\alpha t_1}. \quad (5.8)$$

Розглянемо похідну функції $\alpha(t)$ в точці O . Загальний вираз похідної експоненціальної функції, яка нам знадобиться надалі, має вигляд:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\alpha * A * e^{-\alpha t} \quad (5.9)$$

В точці O значення похідної буде:

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{t=t_1} = tg\gamma. \quad (5.10)$$

Таким чином, шуканий відрізок MN чисельно дорівнює:

$$MN = \frac{A * e^{-\alpha t_1}}{-\alpha * e^{-\alpha t_1}} = \frac{1}{\alpha}. \quad (5.11)$$

Тобто піддотична експоненціальної функції постійна і не залежить від вибору точки на кривій і від початкового значення функції.

Величина відповідна виразу MN на вісі абсцис і яка має розмірність часу, називається сталю часу і позначається літерою τ . Термін «стала часу» є величина піддотичної влюбій точці експоненти. Стала часу є величина зворотна коефіцієнту загасання:

$$\tau = \frac{1}{\alpha}. \quad (5.12)$$

Використовуючи сталу часу експоненціально убуваючу функцію можна записати у вигляді

$$\alpha(t) = A * e^{-\alpha t_1}. \quad (5.13)$$

Як відомо із курсу математики, експоненціальна функція $e^{-\frac{t}{\tau}}$ (або $e^{-\alpha t_1}$) може бути розкладена в ряд

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{1}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \dots \quad (5.14)$$

З задовільною для практики точністю за $t/\tau < 1$ функцію можна апроксимувати декількома першими членами ряду. Так, якщо обмежитися першими двома членами ряду розкладання

$$e^{-\frac{t}{\tau}} \approx 1 - \frac{t}{\tau} \quad (5.15)$$

То похибка не перевищить 10%, коли $t/\tau \leq 0,35$, і всього 1,2% за $t/\tau \leq 0,15$.

При розв'язанні практичних задач часто доводиться зустрічатися з експоненціальною функцією часу

$$\alpha_1(t) = A(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (5.16)$$

Величина якої, як це легко помітити, при $t=0$ рівна нулю, а при збільшенні t монотонно зростає, прагнучи до значення A за $t \rightarrow \infty$.

В таблиці 5.2 приведені деякі значення функцій $e^{-\frac{t}{\tau}}$ і $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$.

Таблиця 5.2. Значення функцій $e^{-\frac{t}{\tau}}$ і $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ за різних значень t .

t	$0,05\tau$	$0,1\tau$	$0,5\tau$	1τ	$1,5\tau$	2τ	$2,5\tau$	3τ	4τ	5τ	∞
$e^{-\frac{t}{\tau}}$	0,95	0,9	0,6	0,37	0,22	0,13	0,08	0,05	0,02	0,007	0
$1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$	0,05	0,1	0,4	0,63	0,78	0,87	0,92	0,95	0,98	0,993	1

На рис. 5.5 побудовані графіки експоненціальних функцій, причому величина A прийнята рівною 1. Відмітимо цікаві особливості експоненціальних кривих.

По закінченні проміжку часу, рівного сталій часу ($t=\tau$), величина експоненціальної спадної функції $\alpha(t)$ (рис. 5.5,а) стає в e разів менше початкового значення (дійсно, $e^{-1}=1/e=0,37$).

Як видно із графіка, з плином часу величина цієї функції спочатку швидко зменшується (інтервал часу від 0 приблизно 3τ), а потім швидкість убутання сповільнюється (швидкість убутання пропорційна ординаті $e^{-\frac{t}{\tau}}$).

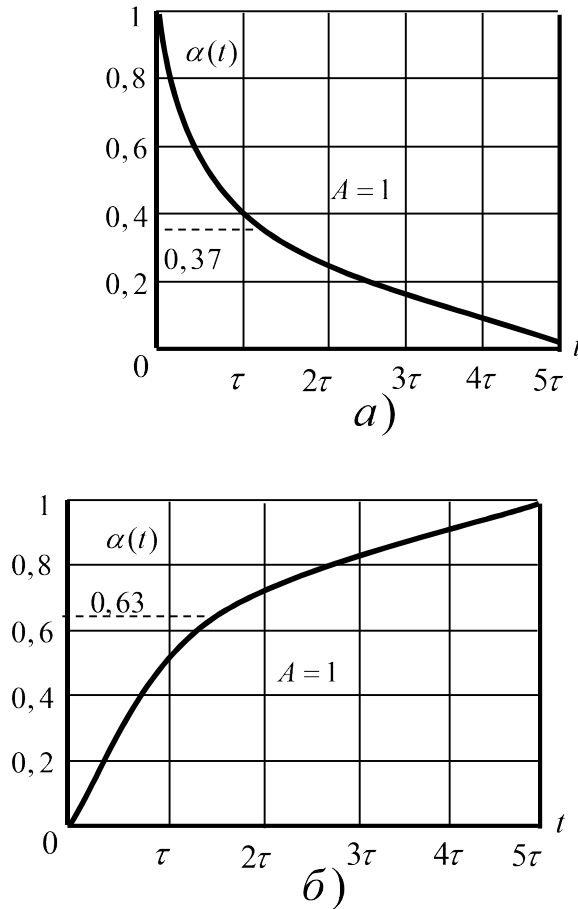


Рис.5.5. Графіки експоненціальних функцій.

а – спадної функції $e^{-\frac{t}{\tau}}$, **б** – функції $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$

Швидкість убутання величини функції $\alpha(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}$ в будь-якій точці визначається її похідною.

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{1}{t} * e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.17)$$

Швидкість убутання обернено пропорційна сталій часу неоднакова в різні моменти часу (як ми це могли вже бачити із рогляду графіка) і має найбільше значення (за абсолютною величиною) в початковий момент ($t=0$)

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{max} = \frac{1}{\tau}. \quad (5.18)$$

Теоретично процес, описуваний експоненціально спадною функцією, триває нескінченно довго (оскільки $e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow 0$ лише за $t \rightarrow \infty$). Однак на практиці процес вважають закінченим на протязі часу $t_{уст}=2,3\tau$, яке

називають часом встановлення за цей час величина $e^{-\frac{t}{\tau}}$ зменшується до 0,05 початкового значення. Іноді тривалість процесу обмежують проміжком $t_{уст}=2,3\tau$, коли величина $e^{-\frac{t}{\tau}}$ стає рівною 0,1 початкового значення.

Експоненціальна крива, описувана функцією $\alpha_1(t)$ монотонно зростає і через проміжок, що дорівнює сталій часу $t=\tau$ досягає значення 0,63 усталеного режиму (Рис.5.5,б). Швидкість зростання величини функції $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ зворотно пропорційна її ординаті. Дійсно, наприклад, в інтервалі від 0 до 2τ величина функції зростає на 82%, а на такому ж проміжку від 2 до 4τ – тільки на 11%. Математично швидкість наростання функції $\alpha_1(t) = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ визначається її похідною

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.19)$$

Вона також обернено пропорційна сталій часу і має найбільше значення в початковий момент часу ($t=0$)

$$\left(\frac{d\alpha_1}{dt}\right)_{\max} = \frac{1}{\tau}. \quad (5.20)$$

Процес, описуваний експоненціальною функцією $\alpha_1(t)$ теоретично також триває безкінечно довго, так як $\alpha_1(t)$ прагне до усталеного значення тільки за $t \rightarrow \infty$. Однак прийнято вважати процес практично закінчується через проміжок $t_{уст}=3\tau$, тобто коли величина $\alpha_1(t)$ стає рівною 0,95 усталеного значення. Якщо процес обмежити моментом, коли величина $\alpha_1(t)$ досягне 0,9 усталеного значення, то його тривалість складе $t_{уст}=2,3\tau$.

5.6. Класичний метод аналізу перехідних процесів.

Задача дослідження перехідних процесів полягає в тому, щоб знайти закономірності відхилень струмів в гілках і напруг на ділянках кола від їх усталеного значення. Є ряд методів аналізу перехідних процесів в лінійних електричних колах. В даному розділі буде розглянуто класичний метод дослідження шляхом розв'язання диференціальних, що описують перехідні процеси.

Перехідні процеси в електричних колах описуються рівняннями, складеними на підставі законів Кірхгофа для миттєвих значень напруги і струму (див.Табл.5.1). Для кіл з зосередженими параметрами ці рівняння після відповідних математичних перетворень приводяться до звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Диференціальні рівняння вивчаються в курсі вищої математики. Тут ми наведемо лише короткі відомості про методи складання і відшукування рішення диференціальних рівнянь, роз'яснюючи їх фізичний зміст.

Диференціальним рівнянням називається рівняння, що зв'язує незалежну змінну, невідому функцію і її похідні. В розглянутих нижче

рівняннях незалежною змінною являється час t , а невідомою функцією $x(t)$ – напруга або струм в частині кола яка нас цікавить. Диференціальні рівняння в яких невідома функція залежить тільки від одного аргумента (у нашому випадку часу) називаються звичайними.

Розв'язанням диференціального рівняння називається функція яка за підставкою її разом з похідними з рівняння звертає його в тотожність. Порядок диференціального рівняння визначається порядком найвищої похідної, що входить до цього рівняння.

Перехідні процеси в електричних колах, що утримують крім активних опорів і джерел енергії один реактивний елемент – котушку (кола RL) або конденсатор (кола RC) описується диференціальними рівняннями першого порядку. За цим послідовно або паралельно з'єднані індуктивності (ємності) слід вважати за одну індуктивність (ємність).

Після простих перетворень диференціальне рівняння першого порядку для електричного кола з одним реактивним елементом може бути приведено до виду

$$\tau \frac{dx}{dt} + x(t) = z(t). \quad (5.21)$$

Де $x(t)$ – шукана функція (напруга або струм); τ – стала часу кола; $z(t)$ – відома функція, яка характеризує зовнішній вплив на електричне коло (напруга або струм зовнішнього джерела).

За $z(t)=0$ виходить рівняння без правої частини, яке називається однорідним диференціальним рівнянням:

$$\tau \frac{dx}{dt} + x(t) = 0. \quad (5.22)$$

Однорідними рівняннями описуються перехідні процеси в електричних колах, в яких відсутні зовнішні впливи. Це кола з ненульовими початковими умовами, перехідні процеси виникають в них внаслідок зміни кількості енергії в електричному чи магнітному полі (наприклад, процеси, що виникають під час замикання зарядженого конденсатора на резистор).

В математиці існують різні методи розв'язування диференціальних рівнянь першого порядку з постійними коефіцієнтами. Для розрахунків перехідних процесів зазвичай користуються так званим «класичним» методом. Згідно цьому методу розв'язання диференціального рівняння (5.21) необхідно шукати у вигляді суми двох доданків

$$x(t) = x_{\text{вм}}(t) + x_{\text{вл}}(t). \quad (5.23)$$

$x_{\text{вм}}(t)$ – вимушена складова шуканої функції (так зване часткове розв'язання вихідного рівняння); $x_{\text{вл}}(t)$ – вільна складова шуканої функції (так зване загальне розв'язання відповідного однорідного рівняння одержаного із рівняння (5.21) за $z(t)=0$).

Вимушена складова $x_{\text{вм}}(t)$ залежить від правої частини диференціального рівняння, тобто від характеру зовнішніх впливів. Якщо

впливова функція, що стоїть в правій частині рівняння (5.21) постійна або ж являється періодичною функцією часу, то значення вимушеного струму (напруги) співпадає з ustalеним i , таким чином, $x_{\text{вм}}(t)$ представляє шуканий струм (напругу) в ustalеному режимі роботи електричного кола. Це розв'язання може бути знайдено відомими методами, використовуваними для розрахунків ustalених режимів лінійних електричних кіл.

Вільна складова $x_{\text{вм}}(t)$ фізично характеризує процеси в електричному колі, у якій відсутній зовнішній вплив. Отже, функція $x_{\text{вм}}(t)$ визначає струм (напругу) виникнення якого обумовлено зміною початкового запасу енергії в магнітному або електричному полі. Кола і характер яких визначається структурою кола і початковими умовами. Однак в колі, де відсутнє джерело енергії, тобто в пасивному колі, внаслідок теплових втрат в резисторах, з'єднувальних проводах і т.д. вільні струми не можуть протікати як завгодно довго і неодмінно з плином часу повинні згаснути. У всіх лінійних електричних колах вільні складові струмів (напруг) загасають за експоненціальним законом через це розв'язання $x_{\text{вм}}(t)$ математично виражається експоненціальною функцією

$$x_{\text{вм}}(t) = A * e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.24)$$

Де A -деяка стала, що називається сталю інтегрування.

Таким чином, розв'язання диференціального рівняння (5.21) можна представити у вигляді

$$x(t) = x_{\text{вм}}(t) + A * e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.25)$$

В електричному колі, процес в якому описується однорідним рівнянням (5.22), очевидно будуть мати місце тільки вільні складові струмів і напруг, бо вимушені складові в колі, де відсутній зовнішній вплив, рівні нулю. Таким чином, розв'язання однорідного рівняння містить лише вільну складову

$$x(t) = x_{\text{вм}}(t) = A * e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.26)$$

Стала інтегрування A знаходиться із початкових умов, які впливають із фізичних властивостей кола. У зв'язку з цим розв'язання задач по перехідним процесам «класичним методом» вимагає ясного розуміння фізичних процесів, що відбуваються в колі.

Рівняння (5.25) показує, перехідний процес, що відбувається в колі, можна розглядати таким, який складається з двох, що накладається один на одного незалежних процесів: вимушеного, який як би настав відразу, і вільного, що має місце під час перехідного режиму. Завдяки вільним складовим струму і напруги в колі протягом перехідного процесу безперервно наближаються до своїх вимушених значень. Отже струми і напруги під час перехідного процесу можуть бути представлені сумою двох складових: вимушеною і вільною. Сума вимушеної $i_{\text{вм}}$ і вільної $i_{\text{вл}}$

складових струму дає значення повного струму i , який в дійсності протікає в якій-небудь гілці під час перехідного процесу $i = i_{\text{вм}} + i_{\text{вл}}$. Сума вимушеної $u_{\text{вм}}$ і вільної $u_{\text{вл}}$ складових напруги дає повну напругу u , яка фактично має місце між якими-небудь точками кола під час перехідного процесу $u = u_{\text{вм}} + u_{\text{вл}}$. З плином часу вільні складові загасають і в колі встановлюється стаціонарний режим.

Звичайно, фізично існують тільки повні струми і напруги, а розкладання їх на вимушену і вільну складові являється зручним математичним прийомом, що використовується в «класичному» методі. Такий метод аналізу може бути застосованим лише до кіл, що підкоряються принципу суперпозиції, тобто до лінійних електричних кіл.

Відшукання рішення, яке для диференціального рівняння (5.21) визначається виразом (5.25), доцільно виконувати в наступному порядку:

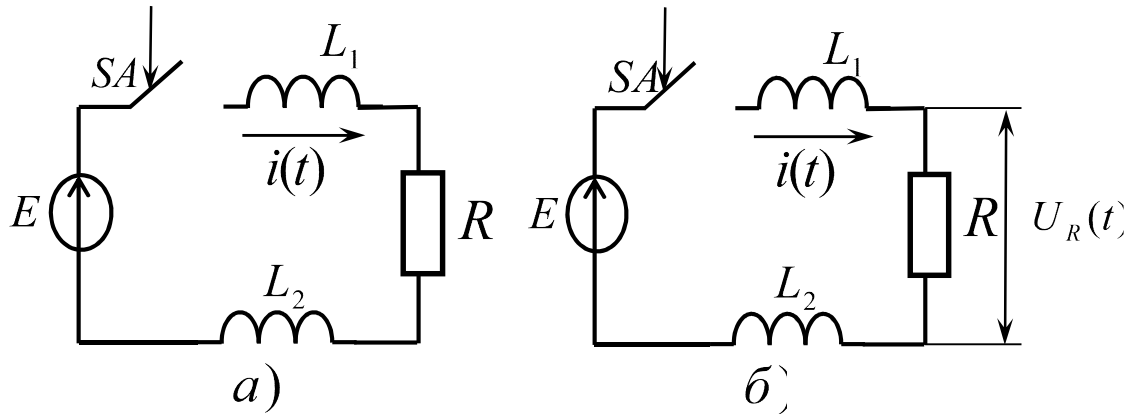
1. За допомогою законів Ома і Кірхгофа обчислюється вимушена (що встановилася) складова струму (напруги) $x_{\text{вм}}(t)$.
2. Використовуючи початкові умови, визначається стала A . Для цього із виразу (5.25) за $t=0$ знаходиться стала шукана функція в початковий момент часу $x_0 = x_{\text{вм}}(0) + A$, бо $1/e^0=1$. Те ж рішення $x(0)$ можна знайти на підставі законів комутації, виходячи із фізичних явищ в колі $x(0)=x_0$, із рівності $x_0 = x_{\text{вм}}(0) + A$ обчислюється стала A .
3. Записується остаточний вираз шуканої функції.

Більш просто, тільки за допомогою операцій 1 і 2, знаходиться розв'язання однорідного рівняння (5.22), так як у цьому випадку $x_{\text{вм}}(t) = 0$.

5.7. Перехідні процеси в колах RL.

Нехай в електричному колі (рис. 5.6) до комутації струм не протікав; в момент часу $t=0$ вона підключається до джерела постійної напруги E .

Знайдемо струм в колі. Насамперед відмітимо, що це коло з нульовими початковими умовами. Перетворимо схему кола, замінив послідовно з'єднані індуктивності L_1 і L_2 однією $L=L_1+L_2$ (рис.5.6,б). Задасмося позитивним напрямом струму в колі, показаним на рисунку 5.6 стрілкою.



**Рис. 5.6. Включення в коло RL джерела постійної ЕРС
а – вихідна схема; б – еквівалентна схема.**

Скористаємося другим законом Кірхгофа (сума спадів напруг на окремих елементах послідовного кола дорівнює зовнішній ЕРС) і для кола рис.5.6,б запишемо рівняння

$$u_L(t) + u_R(t) = E$$

справедливе для часу $t \geq 0$. Підставимо значення $u_L(t)$ і $u_R(t)$, взявши їх з таблиці 5.1, з урахуванням того, що для схеми рис.5.6,б $i_L = i_R = i(t)$.

Тоді,

$$L \frac{di}{dt} + i(t) = \frac{E}{R}. \quad (5.28)$$

Як і слід було очікувати вийшло диференціальне рівняння першого порядку, що утримує невідому функцію (струм $i(t)$) і її першу похідну $\frac{di}{dt}$. Стала часу у цьому випадку $\tau = L/R$, а зовнішній вплив $z(t) = \frac{E}{R} = const$. Згідно формулі 5.25 розв'язання одержаного рівняння слід шукати у вигляді суми

$$i(t) = i_{\text{вм}}(t) + i_{\text{вл}}(t) = i_{\text{вм}}(t) + A * e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.29)$$

Знаходимо вимушену складову струму $i_{\text{вм}}(t)$, яка в цьому разі співпадає з усталеним значенням струму в колі I_0 . За законом Ома визначаємо

$$i_{\text{вм}}(t) = I_0 = \frac{E}{R}. \quad (5.30)$$

Скориставшись початковими умовами знайдемо сталу A . Із виразу для $i(t)$ за $t=0$ маємо $i(0) = i_{\text{вм}}(0) + A = I_0 + A$. З іншої сторони, згідно першому закону комутації струм $i(0_-) = i(0_+) = i(0) = 0$, так як в момент безпосередньо перед комутацією струму в колі не було. Таким чином, використовуючи одержані вирази для $i(0)$, можна записати

$$I_0 + A = 0, \text{ звідки } A = -I_0.$$

Отже, вільна складова струму в колі буде

$$i_{\text{вл}}(t) = -I_0 * e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.31)$$

Записуємо тепер вираз для повного струму в колі

$$i(t) = I_0 - I_0 * e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L} * t}\right). \quad (5.32)$$

На рис.5.7 приведені види кривих зміни i , $i_{\text{вм}}$, $i_{\text{вл}}$, i_{UL} . В колі RL (рис. 5.6,б) під час вмикання на постійну ЕРС.

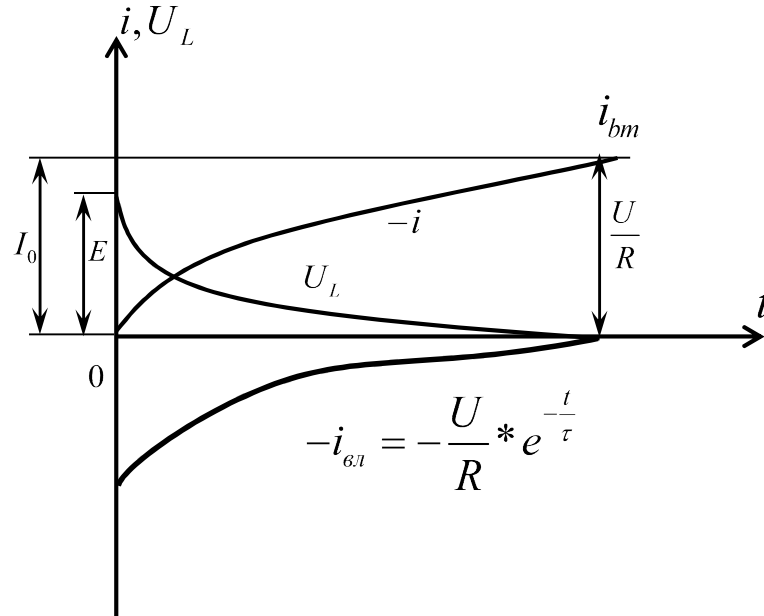


Рис. 5.7. Криві зміни струмів i , $i_{\text{вм}}$, $i_{\text{вл}}$, i_{UL} в колі RL під час вмикання на постійну ЕРС-Е.

Криві зміни показують, що струм в колі не встановлюється миттєво і що потрібний відомий час (теоретично безкінечний) для досягнення ним свого вимушеного значення E/R . Струм i зростатиме тим повільніше, чим більша стала часу кола τ , тобто чим повільніше загасає вільний струм $i_{\text{вл}}$.

Енергія, що отримується від джерела, йде частинною на збільшення енергії магнітного поля котушки, а частинною переходить в теплоту в її опорі R .

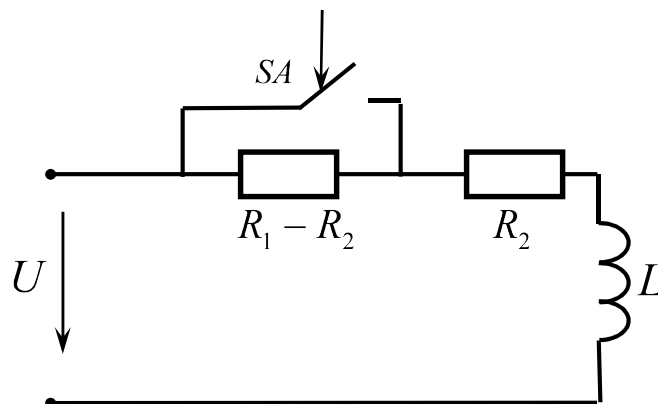


Рис. 5.8

Задача 5.1. В колі (рис.5.8) $R_1=20$ Ом, $L=0,6$ Гн, підключеної до джерела постійної напруги $u=220$ В відбувається раптове зменшення опору від величини $R_2=12$ Ом, так як вимикач SA замикає накоротко частину опору R_1 , рівну $R_1 - R_2=8$ Ом.

Знайти закон зміни струму в колі:

Розв'язання. Із Формули 5.29 (за $\tau = L/R$) можемо відразу написати вираз для вільної складової струму

$$i_{\text{вл}} = A * e^{-\frac{R_2}{L} * t} = A * e^{-\frac{12}{0,6} * t} = A * e^{-\frac{t}{0,05}}$$

І для повного, або перехідного струму i

$$i = i_{\text{вм}} + i_{\text{вл}} = \frac{u}{R_2} + A * e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{220}{12} + A * e^{-\frac{t}{\tau}} = 18,3 + A * e^{-\frac{t}{0,05}}$$

Із умови відсутності стрибка струму i при $t=0$ одержимо:

$$i = i_{\text{вм}} + i_{\text{вл}} = \frac{u}{R_2} + A * e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{220}{12} + A * e^{-\frac{t}{\tau}} = 18,3 + A * e^{-\frac{t}{0,05}}$$

Із умови відсутності стрибка струму i при $t=0$ одержимо

$$i_{\text{вм}}(0_-) = \frac{u}{R_1} = \frac{220}{20} = 11 = i(0) = 18,3 + A.$$

Звідки

$$A = -7,3,$$

Остаточно $i = 18,3 - 7,3 * e^{-\frac{t}{0,05}}$.

Відмітимо, що стала часу кола після комутації визначається параметрами L і R_2 . Криві струмів i і $i_{\text{вл}}$ показані на рис.5.9. Із них видно, що струм i поступово зростає від меншого значення $\frac{u}{R_1} = 11$ А до більшого $\frac{u}{R_2} = 18,3$ А.

Перехідний процес за раптово збільшення опору кола аналогічний розглянутому. Тільки струм буде поступово зменшуватися.

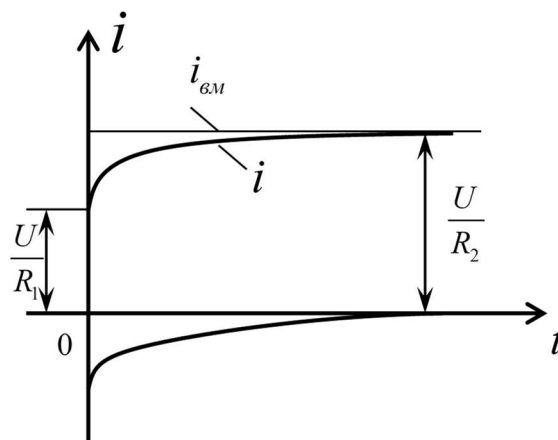


Рис. 5.9. Струми $i(t)$ за раптовим зменшенням опору кола.

5.7.1. Включення в коло RL гармонічної (синусоїдальної) ЕРС.

Нехай зовнішній вплив на коло за $t \geq 0$ виражається синусоїдальною функцією.

$$e(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$$

Для аналізу процесів у колі скористаємося «класичним» методом і вихідне рівняння з урахуванням впливової напруги запишемо у вигляді:

$$\frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi)$$

Вимушений струм, який одночасно являється і сталим струмом, визначається за законом Ома для кола змінного струму в стаціонарному режимі

$$i_{bm} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

$$\text{де } I_m = \frac{U_m}{Z} \text{ – амплітуда сталого струму у колі;}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \text{ – модуль повного опору кола;}$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \text{ – фазовий зсув між струмом у колі і впливовою (зовнішньою) напругою.}$$

Підставив значення для I_{bm} , одержимо:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + A * e^{-\frac{t}{\tau_L}}$$

Знайдемо постійну А, використавши початкові умови; струм у колі до комутації дорівнював нулю. Із останнього рівняння за $t=0$ маємо $i(0) = I_m \sin(\psi - \varphi) + A$ Згідно першого закону комутації $i(0_-) = i(0_+) = i(0) = 0$

Використавши обидві умови, знайдемо $A = -I_m \sin(\psi - \varphi)$

Таким чином, вільна складова струму у колі:

$$i_{вл} = -I_m \sin(\psi - \varphi) * e^{-\frac{t}{\tau_L}}$$

А повний струм у колі визначиться виразом:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_L}}$$

Із останнього рівняння випливає, якщо включення відбувається в момент, коли $\psi - \varphi = \pm \pi / 2$, то початкове значення вільного струму буде максимальним.

Початкові ординати вимушеного і вільного струмів однакові за абсолютною величиною і протилежні за знаком, через це струм i в момент $t=0$ дорівнює нулю. Вимушений струм синусоїдний, а вільний згасає, не змінюючи свого напрямку. На початку перехідного процесу у ті моменти,

коли обидві складові мають однаковий напрям, а вимушений струм наближається до своєї амплітудної величини, амплітуда повного струму в колі приймає найбільше значення, приблизно рівне подвійній амплітуді I_m вимушеного (усталеного) струму. Це особливо помітно, якщо вільний струм повільного згасає (за малих R). По мірі згасання $i_{вл}$ повний струм у колі прагне до значення вимушеного (сталого) струму.

Цікаво відмітити, що, якщо включення відбувається в момент коли $\psi - \varphi = 0$, то вільна складова струму взагалі не виникає $i_{вл}(0) = 0$ (так як $\sin 0^\circ = 0$) і у колі відразу встановлюється струм стаціонарного режиму. Причина такого незвичайного, на перший погляд, явища полягає в тому, що вимушений струм, який при $\psi - \varphi = 0$ дорівнює $i_{вм} = I_m \sin \omega t$, в момент $t = 0$ перетворюється в нуль і, таким чином, початкові умови $i(0) = 0$, що впливають із першого закону комутації, виконується без вільного струму.

Задача 5.2. Котушка, що володіє опором $R = 0,2$ Ом і індуктивність $L = 0,1$ Гн, включається в коло постійного струму напругою 220В. Визначити значення струму i в колі для різних моментів часу.

Розв'язання. Значення повного струму в довільний момент часу після включення котушки (див. рис. 5.6, б) знаходимо із рівняння (5.32) з урахуванням, що при $t = 0$, $I_0 = u/R$

$$i = i_{вм} + i_{вл} = \frac{u}{R} - \frac{u}{R} * e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{u}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = \frac{100}{0,2} (1 - e^{-2t}) A$$

Розрахунки вводимо в таблицю

t, c	0	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	∞
e^{-2t}	1	0,818	0,606	0,367	0,135	0,049	0,018	0,007	0
i, a	0	91	195	316	432	475	491	496	500

Стала часу $\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,1}{0,2} = 0,5 c$. Із таблиці видно, що через час $t = 5\tau = 2,5 c$ струм досягає величини, досить близькою до усталеного значення (різниця біля 1%).

5.8. Перехідні процеси в колах RC.

Рівняння послідовного кола RC.

Кола з елементами RC являються складовими частинами великої кількості схем керування напівпровідниковими пристроями: випрямлячами, перетворювачами, підсилювачами, сигнальними приладами тощо. Через це перехідні процеси в них представляють значний практичний інтерес.

Розглянемо найпростіше послідовне коло RC, показане на рис 5.10. Підключимо незаряджений конденсатор C через резистор R до джерела напруги $e(t)$. Після переведення вимикача SA в положення 1 (момент часу $t = 0$). В колі виникне перехідний процес, оскільки напруга $U_C(t)$ на

конденсаторі може змінитися тільки за кінцевий час. В колах RC зазвичай рекомендується спочатку знайти напругу на конденсаторі, а потім струм.

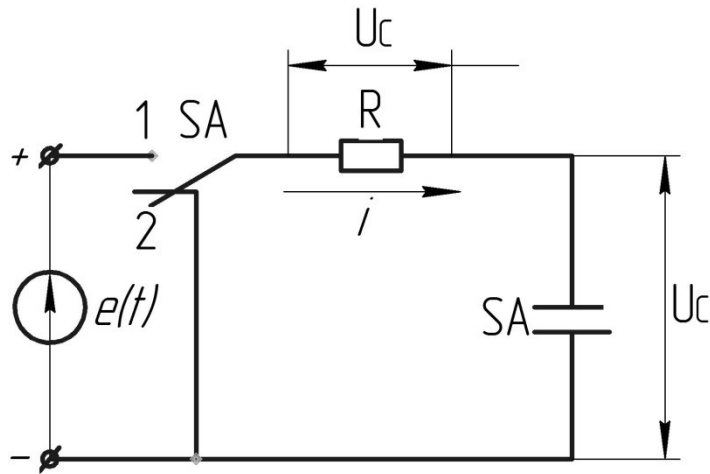


Рис. 5.10 Схема кола RC

Скористуємося другим законом Кірхгофа (сума спадів напруги на резисторі R і конденсаторі C дорівнює зовнішній ЕРС) і для $t \geq 0$ складемо рівняння.

$$U_R + U_C = e(t)$$

Виразимо напругу на резисторі $U_R = U_{iR} = U_i$ через U_C . Враховуючи, що за послідовним з'єднанням R і C струм на будь-якій ділянці кола однаковий і дорівнює $i = i_C = C dU_C/dt$, ми в праві записати $U_R = RC dU_C/dt$. Підставивши значення U_R у вихідне рівняння, одержимо:

$$RC dU_C/dt + U_C = e(t) \quad (5.33)$$

Цей вираз являє собою диференціальне рівняння першого порядку, по своїй структурі аналогічне рівнянню (5.21) у якому відомою функцією являється напруга $U_C(t)$, а величина $\tau = RC$. В разі використання «класичного» методу рівняння напруги $U_C(t)$ слід шукати у вигляді суми вимушеної $U_{C.вм}(t)$ і вільної $U_{C.вл}(t) = Ae^{-t/RC}$ складових, тобто

$$U_C(t) = U_{C.вм}(t) + Ae^{-t/RC} \quad (5.34)$$

Далі розглянемо перехідні процеси в колах RC за різних зовнішніх впливах.

5.8.1. Включення в коло RC постійної ЕРС.

Нехай в момент $t=0$ за переводом вимикача SA (рис. 5.10) в положення 1 коло RC підключається до джерела постійної ЕРС, причому верхній на схемі контакт джерела позитивний. В момент стрибка вхідної напруги опір конденсатора дорівнює нулю, так як згідно другому закону комутації напруга на ньому миттєво змінюватися не може, через це в початковий момент напруга джерела цілком виявляється прикладеним до

резистора. Потім конденсатор починає заряджатися, на його обкладках накопичується заряд і напруга між ними поступово зростає. Оскільки для будь-якого моменту справедливе рівняння $U_R + U_C = E$, тобто за збільшенням напруги U_C спад напруги на резисторі, а отже, і струм у колі зменшуються. Нарешті, U_C стає рівним ЕРС джерела E і процес заряду конденсатора закінчується, струм в колі стає рівним нулю.

Розглянемо математичні залежності за $e(t) = E$ рівняння (5.33) можна записати у вигляді:

$$RCdU_C/dt + U_C = E. \quad (5.35)$$

Вимушена складова напруги, очевидна рівна $U_{C,вм} = E$, оскільки в установленому режимі конденсатор заряджається до ЕРС зовнішнього джерела. Тоді згідно виразу (5.34) маємо:

$$U_C = E + Ae^{-t/RC}. \quad (5.36)$$

Для визначення сталої A , скористаємося початковими умовами, які складаються із того, що до моменту комутації конденсатор був розрядженим, тобто $U_C(0_-) = 0$. Із виразу (5.36) для моменту $t = 0$ маємо $U_C(0) = E + A$. з іншої сторони, згідно другого закону комутації, напруга $U_C(0_-) = U_C(0_+) = U_C(0)$. Із цих двох співвідношень знаходимо $A = -E$.

Таким чином вільна складова напруги на конденсаторі дорівнює $U_{C,вл} = -E e^{-t/RC}$, а повна напруга на конденсаторі в процесі його заряду замінюється в часі виразом:

$$U_C = E - Ee^{-t/RC} = E(1 - e^{-t/RC}). \quad (5.37)$$

по експоненціальному закону, прагнучи до величини E .

На рис. 5.11 приведені графіки повної напруги на конденсаторі, а також вимушеної і вільної складових. Звернемо увагу, що в момент $t = 0$ сума напруг $U_{C,вм}(0) + U_{C,вл}(0) = 0$, чим забезпечується виконання початкових умов.

За значеннями $t/RC \leq 0.3$, тобто на початковому етапі переходного процесу функція $e^{-t/RC}$ з задовільною для практичних цілей точністю може бути апроксимована рядом розкладання (1). Тоді для напруги U_C отримаємо вираз:

$$U_C \approx Et/RC,$$

із якого випливає, що наростання напруги на конденсаторі на початку процесу відбувається за лінійним законом.

Струм в колі (струм заряду конденсатора) може бути знайденим диференціюванням виразу для U_C . Він, очевидно, повинен містити тільки вільну складову, так як в установленому режимі струм в колі дорівнює нулю. Дійсно,

$$i = i_C = CdU_C/dt = Ee^{-t/RC} / R \quad (5.38)$$

Спад напруги на резисторі

$$U_R = iR = Ee^{-t/RC} \quad (5.39)$$

Струм в колі та напруга на резисторі протягом часу спадають за однаковим експоненціальним законом. Цей струм має максимальне значення в початковий момент, причому його початкова величина обмежується тільки опором резистора R . графік кривої струму показаний на рис. 5.11 б.

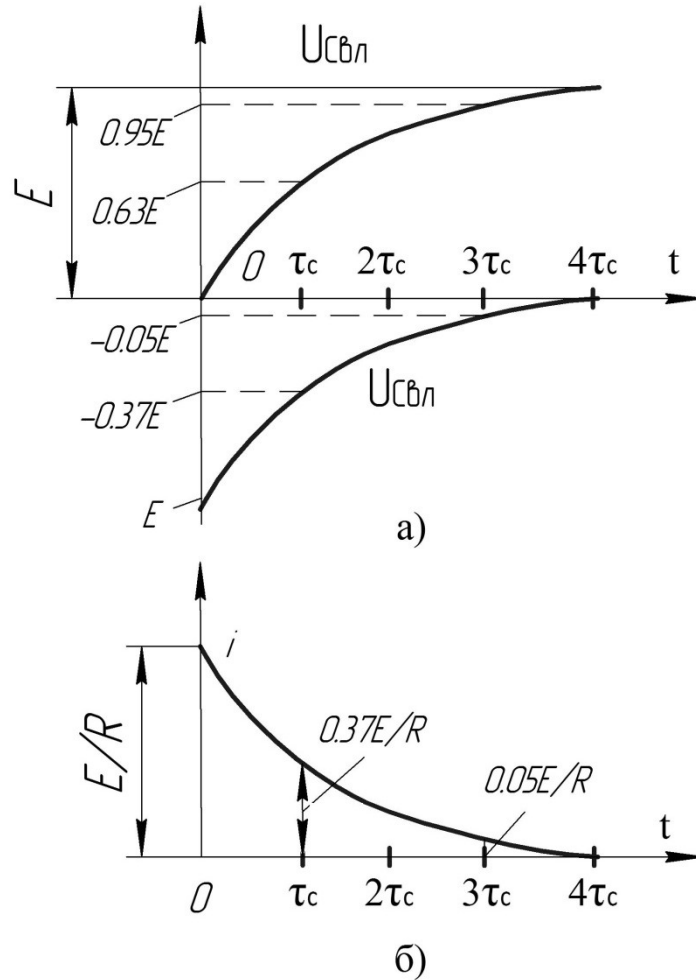


Рис. 5.11. Криві зміни напруги на конденсаторі (а) і струму (б) в колі RC за включенням на постійну ЕРС (заряд конденсатора).

Зауважимо, що в момент включення струм конденсатора змінюється стрибком від нуля до максимального значення; це фізично можливо, так як стрибок струму в колі не призводить до стрибкоподібної зміни запасу енергії в електричному полі конденсатора.

Добуток RC для даного кола є величина постійна (оскільки R і C не змінюються). Цей добуток позначається буквою $\tau_c = RC$ і називається сталюю часу кола RC. Розмірність сталої часу – секунда.

$$|\tau_c| = |R||C| = |\text{Ом}||\Phi| = [B/A][A \times c/B] = [c]. \quad (5.40)$$

Тривалість перехідного процесу залежить від сталої часу. Дійсно, чим більший опір резистора R , тим повільніше заряджається конденсатор, а чим більша ємність конденсатора C , тим більший заряд треба накопичити на пластинах для одержання напруги E . Таким чином, чим більша стала часу кола, тим більша тривалість перехідного процесу.

Фізично стала часу представляє час протягом якого вільні складові струму і напруги в колі зменшуються в e разів.

Після закінчення часу $t_{\text{вст}} = \tau_c$, яке називається часом встановлення, перехідний процес прийнято вважати закінченим, напруга на конденсаторі стає рівною $0,95E$, а струм в колі зменшується до $0,05$ початкового значення (рис. 5.11).

Наприклад, заряд конденсатора ємністю 50 мкФ через резистор з опором 1 кОм практично закінчується через $3RC = 3 \times 1000 \times 10^{-6} = 0.15 \text{ с}$.

Щоб отримати уявлення про швидкість наростання напруги dU_C/dt на конденсаторі, знайдемо з рівняння (5.35) похідну:

$$dU_C/dt = E - U_C/RC.$$

Величина dU_C/dt обернено пропорційна сталій часу кола. Швидкість наростання напруги зменшується по мірі того, як сама напруга збільшується тобто по мірі заряду конденсатора, а в початковий момент, коли $U_C(0) = 0$ має максимальне значення:

$$(dU_C/dt)_{\text{макс}} = E/RC. \quad (5.41)$$

Такі висновки впливають з властивостей експоненціальної функції, яка в даному випадку визначає закон наростання напруги на конденсаторі.

Під час перехідного процесу в електричному полі конденсатора відбувається безперервне накопичення енергії, яка в установленому режимі ($t \rightarrow \infty$) дорівнює $W_C = CE^2/2$. Одночасно частина енергії, що віддається джерелом, виділяється у вигляді тепла в резисторі. Ця енергія може бути розрахована за формулою:

$$W_R = \int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{E^2}{R} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{\tau_c}} dt = \frac{CE^2}{2}.$$

Цікаво відмітити, що енергія W_R , що витрачається в резисторі від його опору не залежить і дорівнює енергії, що запасається в електричному полі конденсатора. Таким чином, ККД процесу заряду конденсатора від джерела постійної напруги дорівнює 50% .

5.8.2. Включення в коло RC гармонічної (синусоїдальної) ЕРС

Електричне коло, що аналізується, приведено на рис. 5.10. Перемикач SA у верхньому положенні, в точці 1. Зовнішній вплив на коло RC $e(t)$ тепер буде гармонічним і за $t \geq 0$ виражається синусоїдальною функцією

$$e(t) = U_M \sin(\omega t + \psi) \quad (5.42)$$

де U_M – амплітуда;

ω – частота;

ψ – початкова фаза коливань.

Вихідне рівняння (5.33) в цьому випадку набуває наступний вигляд

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_M \sin(\omega t + \psi) \quad (5.43)$$

Припускаючи, що ємнісний елемент попередньо не був заряджений, у момент підключення кола до джерела, напруга на затискачах ємнісного елемента дорівнює нулю. Це можна пояснити накладанням вимушеної складової напруги на конденсаторі, рівно як вимушеної складової струму у колі, очевидно співпадають зі своїм сталим значенням. Тому для визначення $U_{C_{\text{вм}}}$ та $i_{\text{вм}}$ скористаємося законом Ома для кола змінного струму. Спочатку знайдемо вимушений струм (струм у колі в стаціонарному режимі).

$$i_{\text{вм}} = \frac{U_M}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (5.44)$$

де $Z = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$ – модуль повного опору кола;

$\varphi = \arctg \frac{1}{\omega CR}$ – фазовий зсув між струмом у колі і прикладеною ЕРС.

Вимушена складова напруги дорівнює:

$$U_{C_{\text{вм}}} = \frac{U_M}{z\omega C} \sin(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}). \quad (5.45)$$

Додаток фази $-\frac{\pi}{2}$ враховує, що напруга на конденсаторі у сталому режимі відстає за фазою від струму у колі на $\frac{\pi}{2}$.

Оскільки $\sin(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}) = -\cos(\omega t + \psi - \varphi)$, то вираз для $U_{C_{\text{вм}}}$ можна записати у вигляді:

$$U_{C_{\text{вм}}} = -\frac{U_M}{z\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi). \quad (5.46)$$

Підставивши це значення у рівняння (5.34) отримаємо:

$$U_{C_{\text{вм}}} = -\frac{U_M}{z\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau C}}. \quad (5.47)$$

Із початкових умов знайдемо постійну A . Напруга на конденсаторі при $t=0$ дорівнює

$$U_C(0) = -\frac{U_M}{z\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + A. \quad (5.48)$$

З іншого боку, за другим законом комутації $U_C(0)=0$ (конденсатор до комутації не був зарядженим). Використавши обидві умови, знайдемо:

$$A = \frac{U_M}{z\omega C} \cos(\psi - \varphi). \quad (5.49)$$

Отже, вільна складова напруги на конденсаторі дорівнює:

$$U_{C_{\text{вл}}} = \frac{U_M}{z\omega C} \cos(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau C}}. \quad (5.50)$$

Тоді повна напруга на конденсаторі під час перехідного процесу дорівнюватиме:

$$U_C = -\frac{U_M}{z\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_M}{z\omega C} \cos(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau C}}. \quad (5.51)$$

Початкові значення (за $t=0$) вимушеної і вільної складових напруги U_C рівні і протилежні за знаком; вона залежить від співвідношення між ψ та φ і максимальні за $\psi - \varphi = 0$.

Напруга на конденсаторі в початковій стадії перехідного процесу може майже в 2 рази перевищувати амплітуду коливань устанавленого режиму. Це явище становить пожежну небезпеку тому, що можливий пробій ізоляції, який призведе до короткого замикання у колі.

Величину струму у колі в перехідному режимі найпростіше знайти за формулою:

$$i = \frac{CdU_C}{dt}.$$

Опустивши проміжні перетворення, напишемо вираз струму

$$i = I_M \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_M \tan \varphi \cos(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau C}}, \quad (5.52)$$

де $I_M = \frac{U_M}{z}$ – амплітуда струму у колі в сталому режимі.

Перший доданок являє собою вимушену, другий – вільну складову струму у колі. Множник $\tan \varphi$, що входить у другий доданок, показує, що вільна складова струму в початковий момент може досягати великої величини. Дійсно, за підключенням до низькочастотного джерела напруги кола RC з невеликим опором в ньому за відповідних умов виникають понад струми. Покажемо це на прикладі.

Нехай коло, у якого $R=100$ Ом, $C=0,01$ мкФ, підключається до джерела з напругою $U=220$ В і частотою 50 Гц. Амплітуда усталеного струму у такому колі визначається в основному ємнісним опором $X_C=1/\omega C$ конденсатора і складає всього

$$I_M = \frac{\sqrt{2}U}{X_C} = 1.41 \cdot 220 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 10^{-8} \approx 1 \text{ мА.}$$

$$\text{Величина } \tan \varphi = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{3.14} \cdot 0.01 \cdot 100 \approx 3200.$$

Якщо включення відбувається в момент, коли $\psi - \varphi = 0$, $\cos(\psi - \varphi) \approx 1$, звідки випливає, що в первісний момент після включення в колі виникає вільна складова струму, максимальна величина якої майже в 3000 разів перевищує амплітуду устанавленого режиму. Така величина пікового струму є катастрофічною для ізоляції елементів кола і може привести до аварії іпожежі.

Задача 5.2. Конденсатор ємністю $C=10$ мкФ заряджається через активний опір $R=9$ Ом за схемою рис. 5.10 від джерела електричної енергії з ЕРС $E=100$ В і внутрішнім опором $R_0=1$ Ом (на схемі не показано). Через проміжок часу, що дорівнює подвоєному значенні сталої часу кола

зарядки, здійснено перемикання і конденсатор почав розряджатися на той же опір R.

Визначити енергію витрачену в опорі R за час зарядження і розрядження конденсатора.

Розв'язання. Закон зміни напруги на конденсаторі в процесі зарядження (див. формулу 5.37)

$$U_C = E(1 - e^{-t/\tau}).$$

До моменту перемикання вимикача SA напруга U_C досягає значення

$$U_C = E(1 - e^{-2\tau_3/\tau_3}) = E(1 - e^{-2}) = 0,8647E = 86,47 \text{ В}$$

Закон зміни струму в процесі зарядження конденсатора (див. формулу 5.38)

$$i_3 = \frac{E}{R+R_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} = 10 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}.$$

Енергія, витрачена в опорі R за зарядженням конденсатора

$$W_1 = \int_0^{2\tau_3} i^2 R dt = R \int_0^{2\tau_3} i^2 dt$$

$$W_1 = 9 \cdot 10^2 \int_0^{2\tau_3} e^{-\frac{t}{\tau_3}} dt = \int_0^{2\tau_3} \frac{900 \cdot \tau_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}}}{2} = 450\tau_3(1 - e^{-4}) =$$

$$= 450\tau_3(1 - 0.01832);$$

$$\tau_3 = (R+R_0)C = 10 \cdot 10^{-6} = 10^{-4} \text{ с}; \quad W_1 \approx 450 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

За розрядження конденсатора енергія, витрачена в опорі R, дорівнює зменшенню енергії електричного поля конденсатора в один і той же час.

Енергія електричного поля до кінця зарядження конденсатора

$$W_e = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 86,47^2}{2} = 375 \cdot 10^{-4} \text{ Дж,}$$

Вся ця енергія виділяється у вигляді тепла в опорі R за розрядженням конденсатора. Таким чином, загальна енергія, що виділяється в опорі R за зарядженням і розрядженням, складає:

$$W = W_1 + W_2 = (450 + 375) \cdot 10^{-4} = 825 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

РОЗДІЛ 6. ЕЛЕКТРОСТАТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ - ТРАНСФОРМАТОРИ

6.1. Загальні відомості

В багатьох виданнях з електротехніки трансформатори відносять до родини електричних машин. Трансформатори являються апаратами, а не машинами, оскільки в них немає рухомих частин.

Трансформатором називається електромагнітний апарат, здійснюючий перетворення змінного (синусоїдного) струму однієї напруги в змінний струм другої напруги без зміни частоти. Таким чином, у трансформаторах відсутнє перетворення одного виду енергії в інший, а відбувається перетворення енергії одних параметрів в електричну енергію інших параметрів. Трансформатор, в якому напруга, що підводиться, підвищується, називається підвищувальним, а трансформатор, у якому напруга живлення, що підводиться, знижується, називається понижувальним. Будь-який трансформатор може бути використаний і як підвищувальний, і як понижувальний.

Винахід трансформатора, пріоритет якого належить електротехніку П.М. Яблочкову, відкрив можливість застосування високого рівня напруги з метою передачі електроенергії на великі відстані, і тим самим був забезпечений широкий розвиток електрифікації.

Трансформатори широко застосовуються в різних областях електротехніки, радіо та відео техніки, електроніки, в пристроях вимірювань, автоматичного управління і регулювання тощо. Вони можуть мати найрізноманітніші призначення й потужність від декількох ВА (наприклад, в пристроях для підзарядки батареї мобільного телефону) до десятків тисяч ВА на потужних електростанціях та вихідні напруги від декількох вольт до 750 кВ.

За конструктивними особливостями і призначенням трансформатори можна розділити на силові, зварювальні, вимірювальні і спеціальні. Найбільше застосування в енергетиці, промисловості і в інших галузях господарювання в цілому по країні одержали силові трансформатори, які являються необхідним елементом по передаванню та розподілу електричної енергії від трансформатора до конкретного споживача (див. рис. 6.1)

За виконанням (кількістю обмоток) трансформатори поділяються на одно-, дво- і багатообмоткові. До однообмоткових відносяться автотрансформатори, у яких між первинною і вторинною обмотками існує не тільки магнітний, а й електричний зв'язок. Двообмоткові трансформатори мають одну первинну і одну вторинну обмотки, які електрично ізольовані одна від одної. Багатообмоткові трансформатори мають одну первинну обмотку і декілька вторинних електрично незв'язаних обмоток.

Залежно від числа фаз трансформатори бувають однофазними і багатофазними (в основному трифазними), причому число фаз первинної обмотки визначається числом фаз джерела живлення, а число фаз вторинної – призначенням трансформатора.

Силові трифазні трансформатори – трансформатори, які встановлюють на початку і кінці лінії електропередачі, на заводах і фабриках, у масивах житлових будинків, при електрифікації сільського господарства, на перетворювальних тягових підстанціях міського електрифікованого транспорту тощо. Такі трансформатори будуються на потужності від декількох десятків тисяч і більше кіловат-ампер.

Змінний струм по шляху від електричної станції, де він утворюється до споживача, де він перетворюється в інший вид енергії, доводиться трансформувати 3-4 рази. Отже, потужність силових трансформаторів, необхідних для передавання і розподілу електроенергії, в 3-4 рази більше потужності установлених на електричних станціях генераторів.

Силові трансформатори відіграють істотну роль в енергетичному господарстві країни. Без них було б неможливе передавання електроенергії на скільки-небудь значні відстані. Відомо, що потужність електричного струму – постійного і змінного – пропорційна добутку напруги на струм. Відомо також, що вибір перерізу проводів при передачі електричної енергії залежить від струму, що проходить по проводах чим більше струм, тим із більшим перерізом необхідно вибирати провід, щоб уникнути надмірних втрат у них напруги та енергії.

Звідси випливає, що при передачі електричної енергії необхідно, щоб струм був якомога меншим, а це може бути досягнуто лише за рахунок підвищення напруги.

Щоб уявити собі значення величини напруги при передачі електричної енергії на значні відстані, розглянемо спрощений розрахунок сили струму в мережі із напругою 400 і 10000 в.

Припустимо, потрібно передати електроенергію для живлення виробничого приміщення трифазною мережею із навантаженням 320 кВт і $\cos\varphi = 0,8$.

Величина струмів:

1. За напругою 400 В,

$$I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{320 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 400 \cdot 0,8} = 578 \text{ A}$$

2. За напругою 10000 В,

$$I_2 = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{320 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 10000 \cdot 0,8} = 23 \text{ A}$$

Чим більша потужність, що передається, і чим на більшу відстань необхідно її передавати, тим вища потрібна напруга лінії електропередачі.

При визначенні необхідної для передачі величини напруги можна користуватися таким простим співвідношенням: на 1 км лінії електропередачі необхідно 1 кВ напруги або довжині лінії в 1 км, відповідає напруга в 1 кВ. Передача енергії на відстань біля 10 км вимагає застосування напруги 10 кВ, а при передачі на відстань 100 км вимагається напруга 100 кВ. Наприклад, від Канівської гідроелектростанції до головної розподільчої підстанції м. Черкас приблизно 100 км, й існуюча повітряна лінія електропередачі має стандартну напругу – 110 кВ.

Приклад загальної схеми передачі енергії з використанням проміжних трансформаторів наведений на рис. 6.1.

У кінці передачі висока напруга 10 кВ знову знижується до 0,4 кВ, оскільки більшість споживачів працюють на величині напруги 380/220 В (двигуни середніх та малих потужностей, освітлювальні мережі та інші), а споживачі високої напруги більше 1000 В, наприклад, двигуни великої потужності виробляють на напругу 6 і 10 кВ. Через це в системах передачі і розподілення електроенергії на промислових підприємствах використовуються як підвищувальні, так і знижувальні трансформатори.

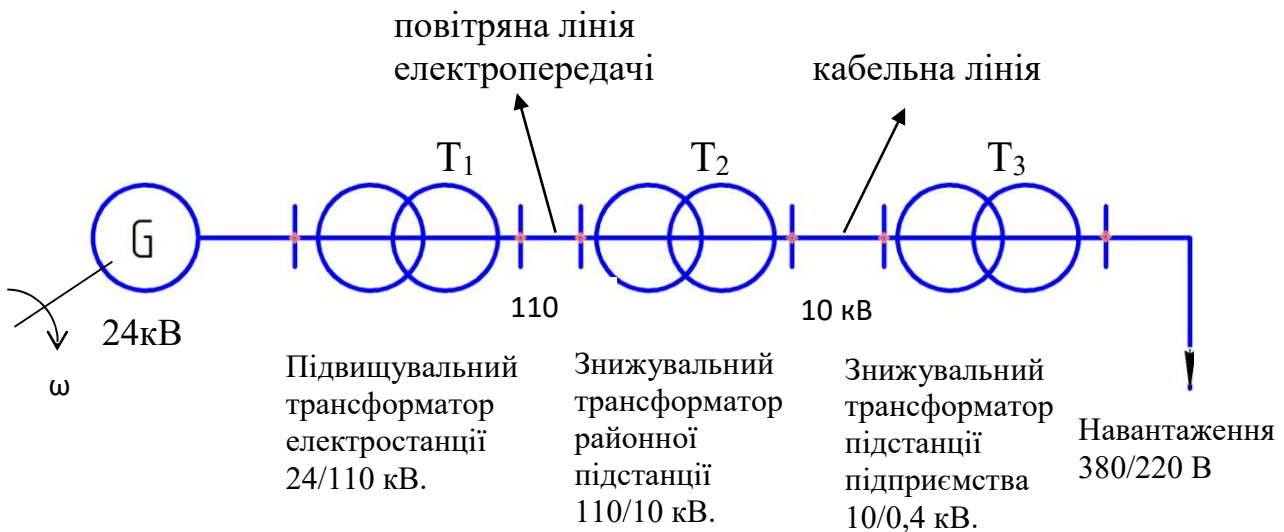


Рис.6.1. Загальна схема передачі електроенергії з використанням проміжних трансформаторів

6.2. Конструктивна будова, види та основні визначення.

6.2.1. Загальні визначення

На рис.6.2,а зображена електромагнітна схема однофазного двообмоткового трансформатора, а на рис.6.2,б – його умовні графічні позначення на електричних схемах.

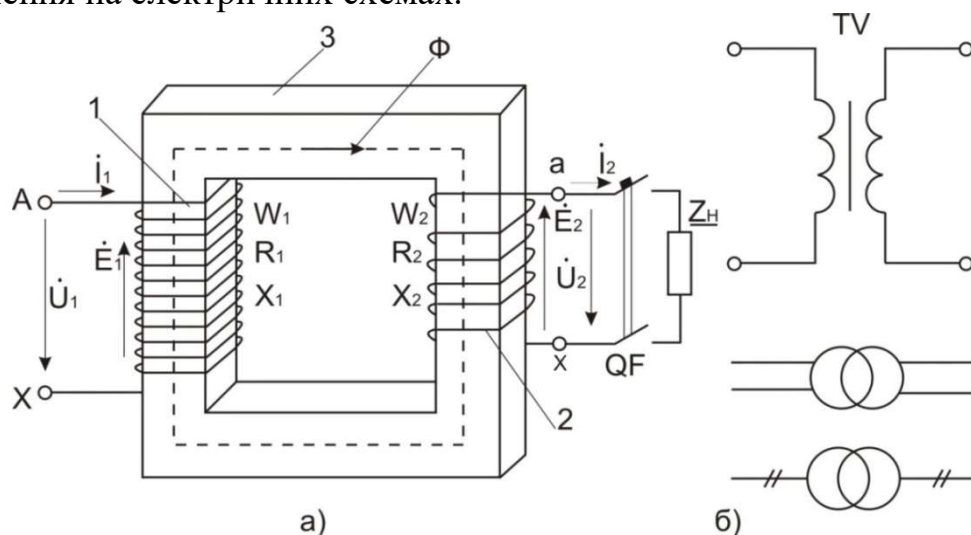


Рис. 6.2. а) Електромагнітна схема однофазного двообмоткового трансформатора; б) умовні графічні його позначення

Трансформатор складається із двох обмоток – первинної 1 і вторинної 2, розташованих на замкненому феромагнітному осерді 3, який для зменшення втрат від вихрових струмів набраний із листової електротехнічної сталі товщиною 0,35-0,5 мм, легованої кремнієм. Магнітопровід слугує для підсилення магнітного зв'язку між обмотками трансформатора, тобто для зменшення магнітного опору контуру, через який проходить магнітний потік Φ трансформатора.

Частина магнітопроводу, на якій розташовані обмотки називається стрижнем, інша частина, що залишається – ярмом.

Обмотка трансформатора 1 (рис.6.2,а) до якої підводиться електрична енергія від джерела живлення, називається первинною. Обмотка 2, від якої відводиться енергія до споживача (навантаження), називається вторинною.

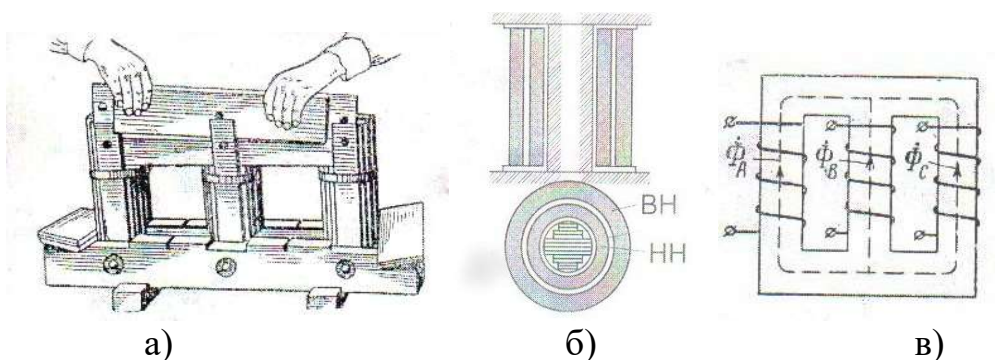
Величини (напруга, ЕРС, струм, число витків і т.д.), що відносяться до первинної обмотки, називаються первинними, і їх буквені позначення наділяються індексом 1 (наприклад, U_1 , I_1 , E_1 , w_1), а величини, що відносяться до вторинної обмотки, називаються вторинними і мають індекс 2 (U_2 , I_2 , E_2 , w_2 і т.д.).

6.2.2. Обмотки трансформатора

У залежності від призначення, кількості фаз потужності трансформатори бувають напругою до 660В – малопотужні трансформатори однофазного загальнопромислового і побутового призначення. За конструктивним виконанням вони бувають броньовані, у яких Ш-подібний магнітопровід і обмотки (первинні і вторинні) виконані на одній котушці, стрижньові, в яких магнітопровід П-подібної форми і обмотки виконані на двох котушках: первинна на одному стрижні, вторинна (або декілька вторинних) на другому стрижні (рис. 6.2, а.). Бувають ще кільцеві трансформатори, у яких магнітопровід виготовлений у вигляді кільця і обмотки на них наносять за допомогою човника. Фізичні процеси, що відбуваються у магнітопроводах різних конструкцій мають один і той же характер і описуються однозначними рівняннями.

Магнітопровід трифазного трансформатора, складається із трьох фазових стрижнів, на яких розташовані три обмотки, вони найчастіше виконуються у вигляді циліндричних котушок із мідних чи алюмінієвих ізольованих один від одного проводів круглого або прямокутного (шина) перерізу.

Первинна і вторинна обмотки зазвичай розташовуються на одному стрижні. Обмотки низької напруги (НН) розташовують ближче до стрижня, а обмотки високої напруги (ВН) – зовні (рис. 6.3,б). Між обмотками знаходиться ізолюючий циліндр. Така конструкція дозволяє зменшити потоки розсіювання і економити ізоляційний матеріал для котушок високої напруги. На рис. 6.3 зображені: загальний вигляд та складання магнітопроводу (осердя) трифазного стрижнього трансформатора; розташування обмоток на осерді однієї фази і умовне графічне позначення обмоток з їх магнітними потоками Φ_A , Φ_B , Φ_C .



**Рис. 6.3.: а) Складання магнітопроводу трифазного стрижнього трансформатора;
б) розташування обмоток на осерді однієї фази;
в) умовне графічне позначення обмоток**

6.2.3. Основні електричні параметри і способи охолодження силових трансформаторів.

На відміну від двигунів і ряду інших приймачів енергії трансформатори нормуються не по активній, а по повній потужності. Це відбувається тому, що розміри трансформаторів для даної частоти визначають в основному дві величини – номінальна напруга і номінальний струм. Номінальний, тобто допустимий за нагріванням, струм визначає переріз проводів обмоток трансформатора. Від напруги, що приходиться на один виток обмотки залежить магнітний потік, а відповідно, і розміри магнітопроводу. Через це основною паспортною величиною трансформатора являється його номінальна повна потужність

$$S_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} * I_{1\text{ном}} \quad (6.1)$$

В процесі трансформування електричної енергії в трансформаторі виникають втрати. Для практичних розрахунків цими втратами нехтують і приймають що повна потужність у вторинному колі при навантаженні трансформатора дорівнює повній потужності первинного кола:

$$U_{2\text{ном}} * I_{2\text{ном}} \approx U_{1\text{ном}} * I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} \quad (6.2)$$
$$S_{1\text{ном}} \approx S_{2\text{ном}}$$

Номінальна повна потужність силового трансформатора разом з іншими технічними даними зазвичай вказується на паспортній таблиці й виражається в кіловольтметрах (КВА).

Номінальна потужність трансформатора являє собою деяку умовну розрахункову потужність передачі енергії струмосприймачам (навантаженню) і на яку він розрахований.

Споживачі, що живляться від трансформатора характеризуються не тільки струмом I_2 і напругою U_2 , а й залежить від коефіцієнта потужності $\cos\varphi$.

Таким чином з урахуванням $\cos\varphi$ трансформатор може прийняти ту чи іншу величину активного навантаження:

$$P = S \cos\varphi \quad (6.3)$$

Де P - активна потужність, кВт;

S - повна потужність трансформатора, кВа.

Як видно із рівняння (6.3) активна потужність трансформатора пропорційна коефіцієнту потужності $\cos\varphi$. Вона залежить від кута ϕ_1 , а отже, і від кута ϕ_2 , тобто від властивостей споживача, і тому не може впливати на розміри трансформатора.

Проте втрати і ККД трансформатора, як буде вказано нижче, залежить від активних потужностей.

Номінальною первинною напругою $U_{1\text{ном}}$ називається напруга, що підводиться від затискачів первинної обмотки і вказана на її паспортній таблиці.

Номинальною вторинною напругою $U_{2\text{ном}}$ називається напруга, що утворюється на затискачах вторинної обмотки при подачі на первинну обмотку номінальної первинної напруги і при розіткненій вторинній обмотці (навантаження відсутнє).

Номинальні струми обмоток $I_{1\text{ном}}$ і $I_{2\text{ном}}$ визначаються номінальним навантаженням трансформатора за умови коли $S \approx S_{\text{ном}}$.

Силові трансформатори за призначенням працюють цілодобово на протязі багатьох років. Строк служби трансформатора (практично ізоляції обмоток) залежить від багатьох факторів: величини завантаження трансформатора, температури навколишнього середовища, способу охолодження, місця установлення, тощо.

Так наприклад строк служби трансформатора, що працює з номінальним навантаженням і установленим на відкритому повітрі місцевості, де максимальне значення температури оточуючого повітря, що природно змінюється на протязі року, не перевищує $+33^{\circ}\text{C}$, практично дорівнює приблизно 20 рокам. За сильно хитрим графіком навантаження з максимумом, що не перевищує або мало відрізняється від номінальної потужності трансформатора при дотриманні правил експлуатації, строк служби трансформатора доходить до 25-35 років, а в окремих випадках навіть до 40 років.

Для забезпечення тривалих строків служби трансформатор необхідно в першу чергу забезпечити ефективним способом охолодження його обмоток.

Втрати ΔP обмоток трансформатора залежать від активних потужностей (I^2R) дорівнюють різниці потужностей первинної і вторинної обмоток:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = U_1 I_1 \cos\varphi - U_2 I_2 \cos\varphi_2. \quad (6.4)$$

Із аналізу роботи трансформаторів різних потужностей і порівняння їх габаритних розмірів можна показати, що потужність втрат у трансформаторі, а значить, і його температура нагрівання з ростом номінальної потужності зростає в більшій мірі, ніж поверхня охолодження. Через це чим більша потужність трансформатора, тим ефективніше повинно бути його охолодження. За способом охолодження трансформатори діляться на сухі й масляні. Трансформатори малої потужності до $20\text{кВ}\cdot\text{А}$ з низькими напругами (до 660В) виготовляють сухими. Вони або природно охолоджуються повітрям, або обдуваються за допомогою вентиляторів. Силові трансформатори середньої і великої потужності, як правило, виконуються масляними. В такому разі магнітопровід з обмотками розташовують в баку, що заповнений трансформаторним маслом. Масло окрім відводу тепла охороняє обмотки трансформатора від стикання з повітрям, що в значній мірі сповільнює старіння ізоляції і збільшує її електричну пробивну міцність.

Заодно відзначимо: трансформаторне масло являє собою добре очищений продукт перегонки нафти. Масло має високу діелектричну міцність (до 40 кВ), володіє невисокою в'язкістю, низькою температурою застигання (-35°C), високою температурою спалаху ($t_{\text{сп}}=135-150^{\circ}\text{C}$) і стійкістю проти окислення за робочих температур.

Будь-які ненормовані умови в роботі трансформатора – перевантаження, недостатнє охолодження тощо – негайно відображаються на маслі, в першу чергу на його температурі. Внутрішні пошкодження трансформатора, як наприклад, витоків замикання, перекриття, пробій, «пожежа сталі», також призводять до зміни у маслі. Через це правильний контроль за якістю масла являється досить важливим в експлуатації трансформатора.

Масляні трансформатори за способом охолодження поділяються на: трансформатори з природним повітряним охолодженням; зі штучним повітряним охолодженням (з дугтям); з примусовою циркуляцією масла і рідинним охолодженням.

У масляних трансформаторах з природним охолодженням відведення тепла здійснюється за рахунок природної циркуляції масла всередині трансформатора і стикання його з внутрішньою поверхнею бака. Для більш ефективного відведення тепла передбачають конструкцію бака і збільшеною поверхнею охолодження: гофрований (рис. 6.4); трубчатий (рис. 6.5,а); потужний трансформатор напругою 110кВ, для зовнішньої установки показаний на рис. 6.5,б; зі охолоджуючими батареями-радіаторами (рис. 6.6). У трансформаторів з штучним повітряним охолодженням радіатори бака примусово обдувають повітрям від вентиляторів, що розташовані поряд з трансформатором або на його візку (рис. 6.7). На рисунку: вентиляційна труба – 1; повітрянопродувна камера, що оперізує трансформатор – 2 і трубки – 3, розташовані на відповідній висоті і наділені отворами для підводу повітря до радіаторів.

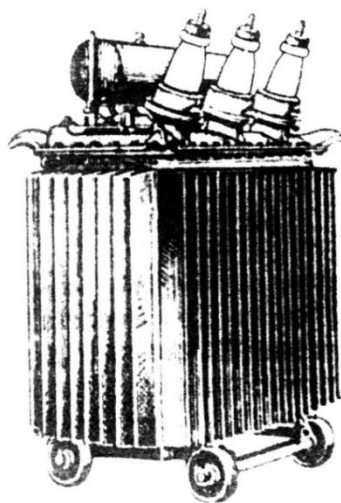
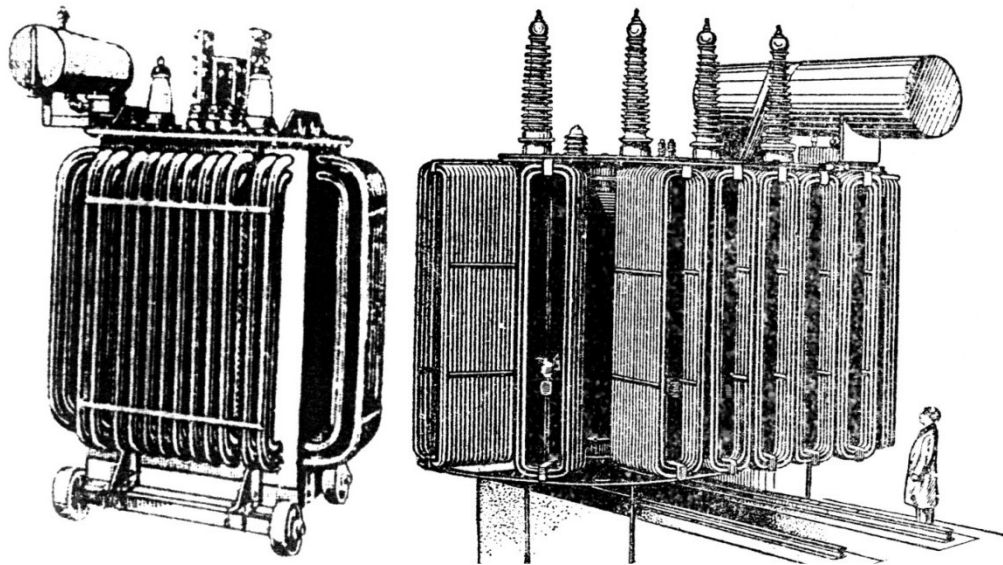


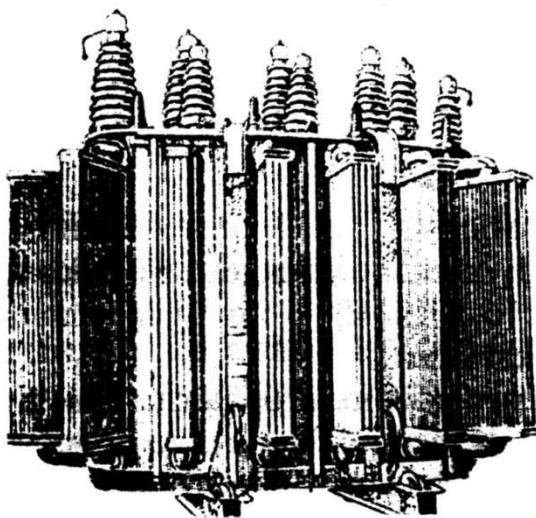
Рис.6.4 Трансформатор з гофрованим баком



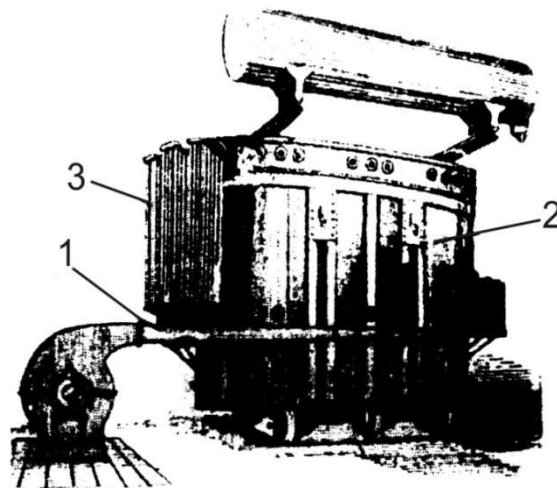
а)

б)

**Рис. 6.5 а) трансформатор з трубчастим баком;
б) потужний трансформатор 110 кВ для зовнішньої установки**



**Рис.6.6. Трансформатор з
радіаторним баком**



**Рис.6.7. Трансформатор з
повітряним охолодженням
(обдувом)**

У наш час в основному застосовують трансформатори з трубчастими баками, тому що їх механічна міцність значно вища, ніж у гофрованих, виготовлення значно простіше, а розміри бака при тій самій потужності трансформатора – менші.

У сучасній енергетиці основним конструктивним типом силового трансформатора загальнопромислового призначення напругою до 10кВ включно є трифазний трансформатор з природним охолодженням. Будова такого трансформатора подана на рис. 6.8.

Для приєднання проводів до затискачів обмоток слугують спеціальні прохідні ізолятори, що називаються виводами високої і низької напруги, які пропускають через кришку бака трансформатора і за допомогою фланців закріплюють на ній болтами. Осердя разом із насадженими на нього котушками обмоток і кришкою з виводами складають виймальну частину трансформатора.

У всіх силових масляних трансформаторах передбачається можливість регулювання напруги, що відводиться до споживачів в межах $\pm 5\%$ номінальної напруги, зазначеної в паспорті.

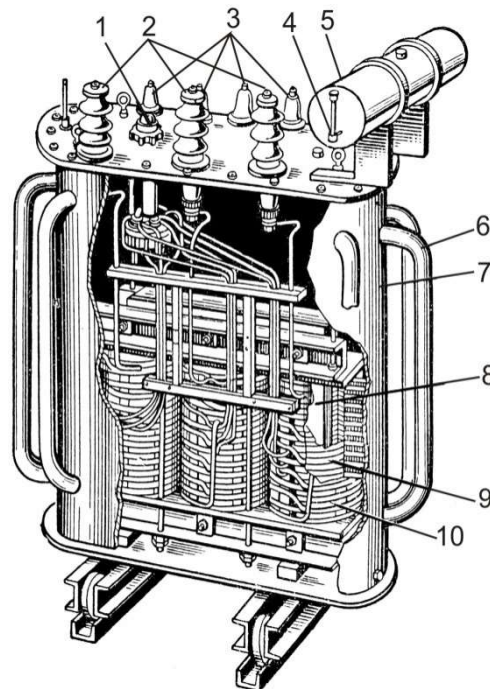


Рис. 6.8. Будова трифазного силового трансформатора типу ТМ-630 кВА: 1 – рукоятка перемикача напруги; 2 – виводи (ізолятори) високої напруги; 3 – виводи (ізолятори) низької напруги; 4 – маслопоказник; 5 – розширювач; 6 – труби; 7 – кожух або масляний бак трансформатора; 8 – осердя (магнітопровід); 9 – обмотка високої напруги; 10 – обмотка низької напруги

Це необхідно для підтримання номінальної (нормальної) напруги (400 чи 230В) на виводах низької сторони трансформатора при коливаннях напруги у високовольтній мережі. Рукоятка перемикача розташована на кришці трансформатора-1 (рис 6.8). Перемикачі дозволяється тільки після

відключення трансформатора від мережі як із боку високої, так із боку низької напруги.

Для підсилення ізоляції обмоток, а також покращання умов відводу тепла від обмоток і сталі магнітопроводу виймальну частину трансформатора вставляють в герметично закритий сталевий бак, доверху заповненим сухим, очищеним від механічних домішок трансформаторним маслом.

З метою кращої віддачі тепла навколишньому повітрю в бак трансформатора для збільшення поверхні охолодження уварюють зігнуті труби, по яким циркулює масло.

Кожух трансформатора повинен бути постійно заповнений трансформаторним маслом. Але воно, як і всяке фізичне тіло, при нагріванні розширюється, а при охолодженні зменшується в об'ємі. Для того щоб дати можливість маслу розширятися, трансформатори, окрім малих потужностей (до 50 кВА), наділяються так званими розширювачами, тобто додатковими бачками, з'єднаними трубкою з баком трансформатора. Їх прилаштовують або на кришці трансформатора, або (для трансформаторів великої потужності) на спеціальних кронштейнах. Розширювач має маслопоказник у вигляді скляної трубки, в якій масло знаходиться на тому ж рівні, що і в розширювачі. На маслопоказнику мається три риски, що показують нормальний рівень масла при температурі $+35^{\circ}$ $+15^{\circ}$ і -35°C .

Промисловістю випускаються також силові трансформатори, заповнені замість трансформаторного масла синтетичною рідиною – совтолом. Совтол – охолоджуюча та ізолююча рідина, негорюча і вибухобезпечна. Трансформатори із заповненням совтолом виробляються тільки в герметичному виконанні (пари совтолу отруйні).

Негативною властивістю совтола є його висока температура застигання – мінус 7°C (температура застигання трансформаторного масла – мінус 45°C).

Альтернативою масляним трансформаторам є сухі силові трансформатори (тобто з повітряним охолодженням). Промисловістю випускались до останнього часу сухі силові трансформатори потужністю до 400 кВА включно, напругу до 700 В.

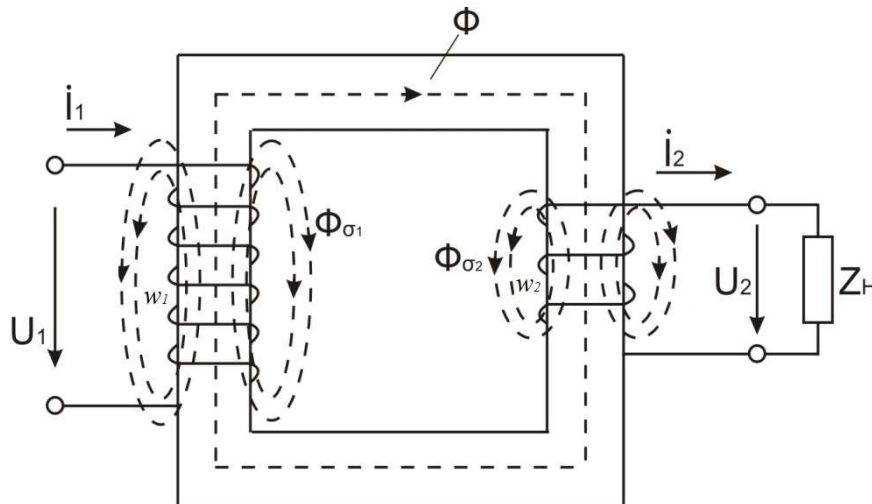
6.3. Принцип роботи трансформатора

Розглянемо принцип роботи трансформатора на прикладі однофазного двообмоткового трансформатора, оскільки робочі процеси, що в ньому протікають, характерні й для інших типів трансформаторів. Якщо первинну обмотку трансформатора приєднати до джерела змінної синусоїдальної напруги U_1 (див. Рис.6.2, а), то в ній виникне струм I_1 , який збуджує у феромагнітному магнітопроводі магнітне поле у вигляді

змінного магнітного потоку Φ_1 . Магнітний потік, що замикається через магнітопровід, перетинає витки первинної і вторинної обмоток. При цьому у відповідності із законом електромагнітної індукції в обмотках будуть наводитися ЕРС e_1 і e_2 відповідно.

При підключенні до затискачів вторинної обмотки навантаження з опором Z_H під дією ЕРС e_2 через неї буде протікати змінний струм i_2 й енергія із кола первинної обмотки буде передаватися в коло вторинної обмотки за рахунок змінного магнітного потоку Φ_1 . Вторинний струм i_2 утворює в осерді трансформатора свій особистий магнітний потік Φ_2 , який накладається на потік первинної обмотки. У результаті в магнітопроводі утворюється загальний магнітний потік Φ , який зчіплюється з витками обох обмоток. Цей потік називають основним або робочим магнітним потоком трансформатора.

Поряд з основним магнітним потоком в трансформаторі існують змінні магнітні потоки розсіювання Φ_{σ_1} і Φ_{σ_2} , що утворюються струмами його обмоток і замикаються навколо витків первинної і вторинної обмоток в основному через повітря, як це показано на рис.6.9.



**Рис. 6.9. Магнітні потоки в магнітопроводі трансформатора:
 Φ – основний; Φ_{σ_1} і Φ_{σ_2} – потоки розсіювання**

Значення потоків розсіювання прямо пропорційні струмам обмоток.

Змінні ЕРС e_1 і e_2 пропорційні кількості витків w_1 і w_2 первинної і вторинної обмоток, а також швидкості зміни потоку $d\Phi/dt$ (закон Максвелла).

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.5)$$

Якщо напруга U_1 являє собою синусоїдальну функцію часу, то, відповідним чином електрорушійні сили e_1 і e_2 та потік Φ , який їх наводить також є синусоїдальними функціями часу. Якщо підставити в формулу 6.5 максимальну функцію магнітного потоку

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

де Φ_m – амплітуда потоку,
 $\omega = 2\pi f$ – кутова частота струму,
 t – час, с.

$$\begin{aligned} \text{Одержимо: } e_1 &= -\omega \cdot w_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right); \\ e_2 &= -\omega \cdot w_2 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (6.6)$$

Одержані рівняння показують, що e_1 і e_2 відстають за фазою від потоку Φ на кут $\frac{\pi}{2}$ або кут 90° .

Діючи значення обох ЕРС відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Із рівнянь (6.7) видно що ЕРС в обмотках пропорційні кількості витків w .

Із формул (6.5) і (6.7) можна написати відношення:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (6.8)$$

Ці відношення називаються коефіцієнтом трансформації трансформатора і позначаються буквою k .

Отже, коефіцієнт трансформації трансформатора – це відношення ЕРС його обмоток або відношення чисел витків цих обмоток. В технічному паспорті трансформатора зазвичай зазначається відношення номінальних напруг в режимі холостого ходу $U_{1НОМ}/U_{2НОМ}$, яке практично дорівнює відношенню ЕРС, оскільки при розімкненій вторинній обмотці напруга, прикладена до первинної обмотки, майже цілком зрівноважується її ЕРС

($U_1 \approx E_1$), а вторинна напруга дорівнює вторинній ЕРС ($U_{20} = E_2$).

Через це вираз для коефіцієнта трансформації можна переписати у вигляді

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{2O}} = \frac{U_{1НОМ}}{U_{2НОМ}} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (6.9)$$

Із формули (6.9) випливає що відношення напруг на обмотках при холостому ході трансформатора також є коефіцієнтом трансформації трансформатора.

У довідниках або на щитку з паспортними даними трансформаторів коефіцієнт трансформації позначається дробовим числом: в чисельнику – висока напруга (в kB), а в знаменнику – низька (також в kB). Наприклад, 6/0,4; 10/0,23 і т.д.

Приклад 6.1. Визначити коефіцієнт трансформації і діючі значення ЕРС E_1 та E_2 обмоток однофазного трансформатора при частоті мережі 50 Гц, якщо площа поперечного перерізу магнітопроводу $S_M = 6 \text{ см}^2$. Амплітудне значення магнітної індукції $B_M = 1,2 \text{ Тл}$, число витків первинної обмотки $w_1 = 650$ і $w_2 = 2600$.

Розв'язання. Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$K = \frac{w_1}{w_2} = \frac{650}{2600} = 0,25.$$

Амплітудне значення магнітного потоку в осерді трансформатор:

$$\Phi_M = B_M \cdot S_M = 1,2 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

$$B_M = 1,2 \text{ Тл} = 1,2 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2};$$

$$S_M = 6 \text{ см}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Діючі значення ЕРС, що наводиться в обмотках трансформатора:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_M = 4,44 \cdot 50 \cdot 650 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} = 104 \text{ В}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_M = 4,44 \cdot 50 \cdot 2600 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} = 416 \text{ В}$$

У разі підключення до вторинної обмотки трансформатора навантаження з опором Z трансформатор починає працювати під навантаженням. У такому випадку в первинній обмотці електрична енергія, що споживається ним із мережі, перетворюється в енергію магнітного поля, а у вторинній обмотці навпаки – енергія магнітного поля перетворюється в електричну, яка потім в основному передається навантаженню (споживачу). Невелика частина потужності втрачається в самому трансформаторі.

Взагалі, трансформатори є дуже економічними агрегатами. При їх роботі мають місце, як і у всякій електричній машині, втрати на нагрівання проводів обмоток і втрати в сталі осердя, але вони невеликі – 2-3% від потужності трансформатора. Через це з деяким наближенням можна рахувати, що потужності, які розвиваються струмом у вторинній і первинній обмотках трансформатора, рівні між собою. А звідси випливає, що рівні між собою і добутки напруг та струмів в обох обмотках:

$$U_2 I_2 = U_1 I_1 \quad (6.10)$$

Із формул 6.8 і 6.10 випливає співвідношення:

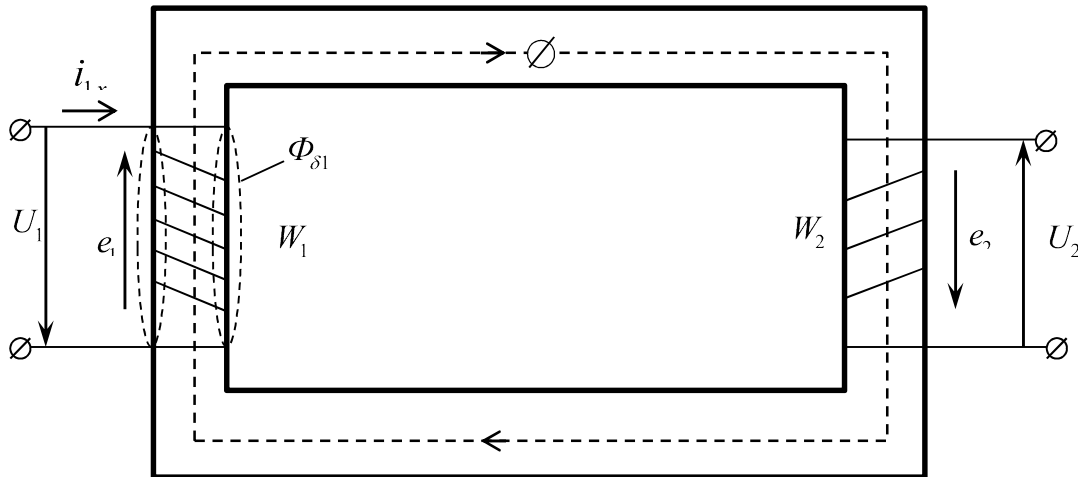
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k. \quad (6.11)$$

Із формули 6.11 можна зробити висновок, що струми в обмотках працюючого з навантаженням трансформатора обернено пропорційні числу витків.

6.4. Режим холостого ходу трансформатора.

6.4.1. Принцип роботи в холостому ході.

Режим холостого ходу називається режим роботи трансформатора, при якому до первинної обмотки підводиться номінальна напруга, а вторинна обмотка розімкнена (рис. 6.10).



Коли до первинної обмотки від джерела синусоїдного струму подати напругу U_1 , то по обмотці піде змінний струм холостого ходу i_{1x} (МДС $F_1 = i_{1x} \omega_1$) викликає в магнітопроводі синусоїдній магнітний потік Φ , який пронизуючи обмотки з числом витків ω_1 і ω_2 , наводить в них згідно закону електромагнітної індукції ЕРС e_1 і e_2 . В п. 6.3 показано (6.6), що $E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi_M$; $E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_M$, тобто ЕРС в обмотках пропорційний числу витків.

Раніше (див. п. 6.3) було показано, що коефіцієнт трансформації є відношення номінальної вищої напруги до номінальної вищої напруги:

$$K = \frac{U_{в.ном.}}{U_{н.ном.}},$$

При чому під номінальними напругами розуміються номінальні напруги в режимі холостого ходу. Так як в цьому режимі $E_1 \approx U_1$ (спад

напруги в обмотці малий, так як струм холостого ходу I_{1x} набагато менший номінального), а $E_2 = U_2$, то для знижувального трансформатора ($U_1 > U_2$) $K = U_{1ном} / U_{2ном} \approx W_1 / W_2$, а для підвищувального ($U_1 < U_2$) $K = U_{2ном} / U_{1ном} \approx W_2 / W_1$ тобто завжди $K \geq 1$ і:

$$U_{в.ном} / U_{н.ном} \approx W_в / W_н$$

6.4.2. ЕРС розсіювання і напруга розсіювання

На рис. 6.9 і 6.10 показано, що деяка частина потоку, що називається потоком розсіювання $\Phi_{\delta 1}$, не замикається по магнітопроводу, хоча і охоплює первинну обмотку – ця частина потоку наводить в первинній обмотці ЕРС розсіювання $e_{\delta 1}$ яку, як показано в розділі 4(4.35), можна представити спадом напруги $U_{\delta 1}$ на індуктивному опорі розсіювання $X_{\delta 1} = \omega L_{\delta 1}$, де $L_{\delta 1} = \psi_{\delta 1} / i_1$, а $\psi_{\delta 1}$ – потокозчеплення розсіювання первинної обмотки. Дійсно, $U_{\delta 1} = L_{\delta 1} \frac{di_{1x}}{dt}$ або в комплексній формі

$$U_{\delta 1} = jX_{\delta 1} I_{1x} .$$

6.4.3. Рівняння електричного стану первинної обмотки.

Будемо розглядати первинну обмотку трансформатора як приймач електричної енергії. За такого трактування функції обмотки виберемо позитивний напрям ЕРС на схемі рівнозначно зміні фази ЕРС на 180° або зміні знаку в законі електромагнітної індукції, яка у цьому випадку приймає вигляд: $U = e = d\psi / dt$ або для ЕРС самоіндукції $U_L = e_L = L di / dt$, і ЕРС e випереджує за фазою магнітний потік на 90° .

Рівняння, записане для контуру первинної обмотки за другим законом Кіргофа (мал. 6.10):

$$e_1 = U_1 - R_1 i_{1x} - L_{\delta 1} di_{1x} / dt$$

або

$$U_1 = e_1 - R_1 i_{1x} + U_{\delta 1}$$

Де $R_1 i_{1x}$ - спад напруги на активному опорі первинної обмотки;

$L_{\delta 1} di_{1x} / dt = U_{\delta 1}$ – спад напруги на опорі розсіювання $X_{\delta 1}$ первинної обмотки

То ж рівняння в комплексній формі:

$$\dot{U} = \dot{E}_1 + R_1 i_{1x} + jX_{\delta 1} I_{1x} \quad (6.13)$$

6.4.4. Векторна діаграма трансформатора

Векторна діаграма трансформатора в режимі холостого ходу трансформатора (рис. 6.13).

З нульової початкової фази обраний нульовий потік, тобто $\varphi = \varphi_M \sin \omega t$. Струм I_{1x} випереджає по фазі магнітний потік на кут втрат δ . Відносно вектора $\dot{\varphi}$ з випередженням на кут 90° побудовані вектори ЕРС \dot{E}_1 і \dot{E}_2 , так як в комплексній формі ЕРС пов'язані співвідношенням $\dot{E} = j\omega W \varphi = \omega W \dot{\varphi} e^{j90^\circ}$.

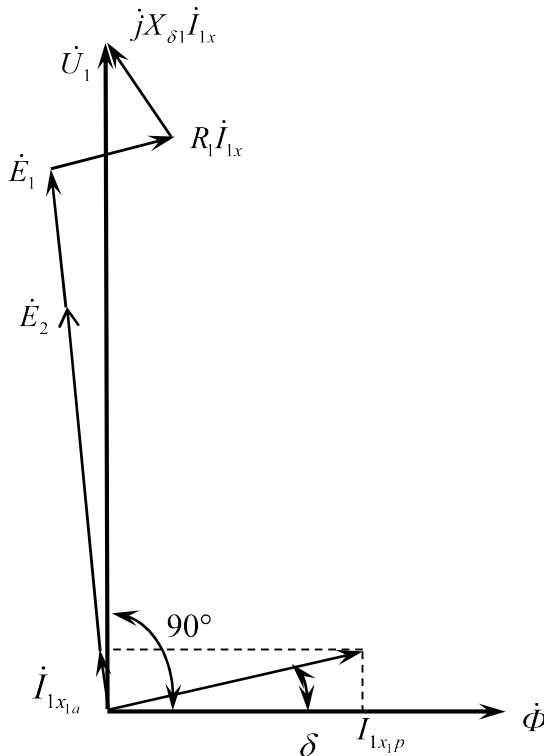


Рис. 6.11. Векторна діаграма холостого ходу трансформатора.

Вектор \dot{U}_1 на підставі рівняння (6.13) дорівнює сумі векторів \dot{E}_1 , $R_1 \dot{I}_{1x}$ (останній співпадає за фазою з вектором \dot{I}_{1x}) і $jX_{\delta 1} \dot{I}_{1x}$ (випереджує вектор струму \dot{I}_{1x} на кут 90°).

6.5. Робочий режим трансформатора.

6.5.1. Робота трансформатора при навантаженні.

Робочий режим – це робота трансформатора якщо до первинної обмотки підвести напругу U_1 , а вторинну обмотку замкнути на будь-який опір навантаження Z_n (під навантаженням розуміється струм вторинного кола – чим він більше, тим більше навантаження). До трансформатора

підключаються різного роду споживачі: електричні двигуни, нагрівальні печі, мережі освітлення тощо.

Схема навантаженого трансформатора приведена на рис. 6.9, а умовно – логічна схема, що ілюструє фізичні процеси і взаємний зв'язок окремих величин, – на рис. 6.12.

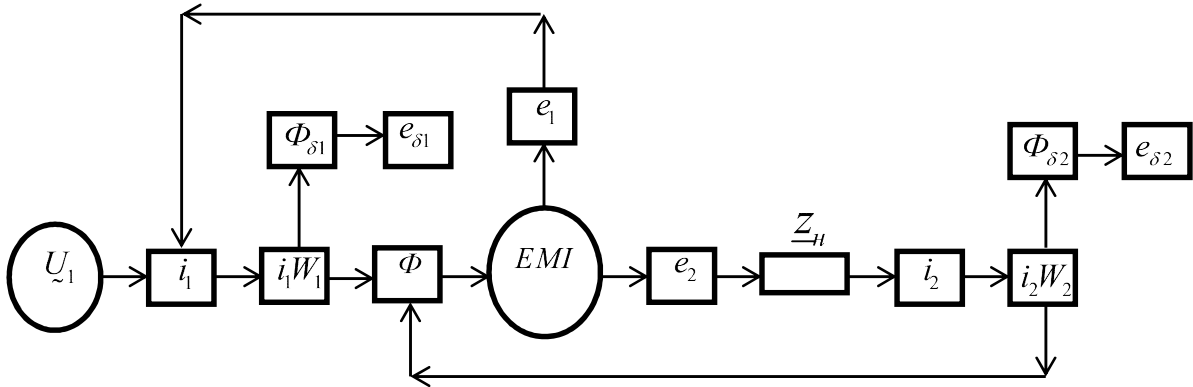


Рис. 6.12. Умовно – логічна схема навантаженого трансформатора

Первинна обмотка підключається до джерела синусоїдної напруги U_1 . Струм i_1 в первинній обмотці або, точніше МРС потік розсіювання $F = i_1 w_1$ утворює основний магнітний потік φ і магнітний потік розсіювання $\varphi_{\delta 1}$. Змінний магнітний потік пронизує обмотки і згідно закону електромагнітної індукції (ЕМІ) в обмотках наводяться ЕРС e_1 і e_2 , вибрані яких позитивні напрямки яких показані на рис. 6.9. До вторинної обмотки підключений споживач з опором z_n (в комплексній формі), тобто вторинна обмотка навантажена опором z_n і струм в ній визиває МРС $F_2 = i_2 w_2$. Як показано на мал. 6.9 МРС F_2 має напрям проти МРС F_1 , тобто потік вторинної обмотки має напрямок назустріч потоку первинної обмотки.

Дійсно, якщо припустити, що МРС $i_2 w_2$ утворює потік φ_2 , спрямований так же, як і потік φ_1 , то результуючий магнітний потік і ЕРС E_1 збільшаться. В результаті і потужність $E_1 I_1$ стане більшою, чим потужність $U_1 I_1$, що підводяться з мережі, що суперечить закону збереження енергії. Таким чином, якби не була покладена вторинна обмотка, її МРС завжди має напрям протилежний МРС первинної обмотки. Цей же висновок впливає з правила Ленца.

Із зміною струму I_2 при незмінному U_1 змінюється струм I_1 , що впливає з закону збереження енергії. Наприклад, при збільшенні струму I_2 посилюється його розмагнічуюча дія, сумарний магнітний потік φ і, отже, ЕРС E_1 повинні зменшитися, але струм I_1 збільшується так, щоб вийшов

потік первісного значення, що, наприклад, видно із (4.35). Таким чином, в трансформаторі діють два зворотні зв'язки: від МРС $F_2 = i_2 w_2$ до магнітного потоку φ і від ЕРС e_1 до струму I_1 (мал. 6.12).

6.5.2. Рівняння магніторушійних сил.

Виходячи з міркувань в п.6.5.1, запишемо рівняння МРС (для миттєвих значень)

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = F_1 - F_2 = F ,$$

Де F – миттєве значення результуючої МРС обох обмоток.

За незмінним діючим значенням напруги U_1 результуючий магнітний потік φ практично залишається також незмінним в режимах від холостого ходу до номінального, тому

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = i_{1x} W_1$$

Або в комплексній формі

$$\dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_{1x} W_1 \quad (6.14)$$

6.5.3. Рівняння струмів.

Розділивши обидві частини (6.14) на w_1 , одержимо:

$$\dot{I}_1 - \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_{1x} \quad (6.15)$$

Позначивши $\frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}'_2$, запишемо для струмів

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + \dot{I}'_2 \quad (6.16)$$

Із (6.16) випливає, що струм \dot{I}_1 , можна розглядати таким, що складається з двох складових: одна \dot{I}_{1x} визначає основний магнітний потік φ , а друга \dot{I}'_2 компенсує розмагнічуючу дію струму вторинної обмотки.

Струм холостого ходу I_{1x} становить лише декілька відсотків струму I_1 . Якщо ним можна нехтувати, то із (6.15) виходить, що струм обмоток I_1 і I_2 обернено пропорційна числам витків, тобто $\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_1}{W_2}$ або з індексами

вищої і нижчої напруги:

$$\frac{I_{в.н.}}{I_{н.н.}} = \frac{W_{н.н.}}{W_{в.н.}}$$

Із (6.17) випливає, що в обмотці з більшим числом витків струм менше.

Приклад 6.2. Визначити коефіцієнт трансформації K трансформатора, число витків w_1 первинної обмотки в разі число витків вторинної обмотки $w_2 = 40$, а також номінальні струми $I_{1ном}$ і $I_{2ном}$ в

обмотках трансформатора з номінальною потужністю $S_{1ном} = 5кВА$, підключеного до мережі живлення з напругою $U_{1ном} 240В$, напруга на затискачах первинної обмотки при холостому ході $U_{2x} = 60В$.

Розв'язання. Коефіцієнт трансформації $K = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{2x}} = \frac{240}{60} = 4$, так

як $U_{2x} = E_2$, для холостого ходу трансформатора на первинній обмотці досить незначна, через це приблизно $U_1 \approx E_1$. Число витків первинної обмотки:

$$W_1 = KW_2 = 4 * 40 = 160$$

Номінальний струм первинної обмотки (з урахуванням, що повні потужності обмоток $S_1 = S_2$):

$$I_{1ном} = S_{1ном} / U_{1ном} = \frac{5 * 10^3}{240} = 20.8A$$

Номінальний струм вторинної обмотки трансформатора (приймаючи $U_{2ном} = U_{2x}$):

$$I_{2ном} = \frac{S_{1ном}}{U_{2x}} = 5000 / 60 = 83.3A$$

Висновок: число витків первинної обмотки у чотири рази більше по відношенню до числа витків вторинної обмотки, а сторони відповідно у чотири рази менше ($I_{2ном} / I_{1ном} = 83.3 / 20.8 = 4$).

6.5.4. Рівняння електричного стану

На рис. 6.9 показана схема підключення до вторинної обмотки навантаження, опір якого в комплексній формі Z_n . При підключенні навантаження як і за холостого ходу будемо розглядати первинну обмотку як приймач, а вторинну обмотку як джерело електричної енергії. За таким трактуванням функцій обмоток ЕРС e_1 має напрям проти позитивного напрямку струму i_1 , а позитивний напрям струму i_2 вторинної обмотки співпадає за напрямком з ЕРС e_2 .

Рівняння складене за другим законом Кіргофа для первинного кола:

$$e_1 = U_1 - R_1 i_1 - L_{\delta 1} di_1 / dt$$

$$\text{Або } U_1 = e_1 + R_1 i_1 + U_{\delta 1},$$

Де $R_1 i_1$ – Спад напруги на активному опорі дроту первинної обмотки;

$U_{\delta 1}$ – спад напруги на опорі розсіювання первинної обмотки.

В комплексній формі:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_1 + U_{\delta 2} = e_2$$

Де U_2 – напруга на затискачах вторинної обмотки;

$R_2 \dot{I}_1$ – спад напруги на активному опорі дроту вторинної обмотки;

$U_{\delta_2} = L_{\delta_2} di_2 / dt$ – спад напруги на опорі розсіювання вторинної обмотки.

В комплексній формі:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_{\delta_2} \dot{I}_2 \quad (6.19)$$

6.5.5. Приведення параметрів вторинної обмотки трансформатора до параметрів первинної.

В багатьох випадках розрахунків електричних кіл з трансформатором ускладнюється із-за магнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками трансформатора. Цю задачу можна спростити якщо для усунення магнітного зв'язку між обмотками скласти еквівалентну електричну схему. Останнє можливо, якщо об'єднати обидві обмотки трансформатора в одну, зробивши рівними ЕРС цих обмоток. $E_1 = E'_2$ (приведені значення величин індексом «штрих» наверху).

Зручним виявляється приведення вторинного кола трансформатора до первинної. Суть такого приведення трансформатора з ЕРС E_2 замінюється розрахунковою, енергетично еквівалентним колом з приведеною ЕРС $E'_2 = E_1$.

Позначимо електричні величини приведенного вторинного кола трансформатора $E'_2, I'_2, U'_2, R'_2, X'_2, Z'_n$ і знайдемо їх співвідношення з відповідними величинами дійсного вторинного кола трансформатора $E_2, I_2, U_2, R_2, X_2, Z_n$. Скористуємося виразами, витікаючими з енергетичної еквівалентності кіл, що розглядаються:

$$\begin{aligned} E_2 I_2 &= E'_2 I'_2 & I_2^2 x_2 &= I'^2_2 x'_2 \\ U_2 I_2 &= U'_2 I'_2 & I_2^2 x_2 &= I'^2_2 x'_2 \end{aligned}$$

Враховуючи, що $\frac{E_1}{E_2} = K$, отримуємо:

$$E'_2 = E_2 k, \quad (6.20)$$

$$I'_2 \frac{E_2 I_2}{E'_2} = \frac{E_2 I_2}{k E'_2} = \frac{1}{k} I_2 \quad (6.21)$$

$$U'_2 = \frac{U_2 I_2}{I'_2} = \frac{k U_2 I_2}{I_2} = k U_2 \quad (6.22)$$

$$R'_2 = \frac{I_2^2 R_2}{I'^2_2} = k^2 R_2 \quad (6.23)$$

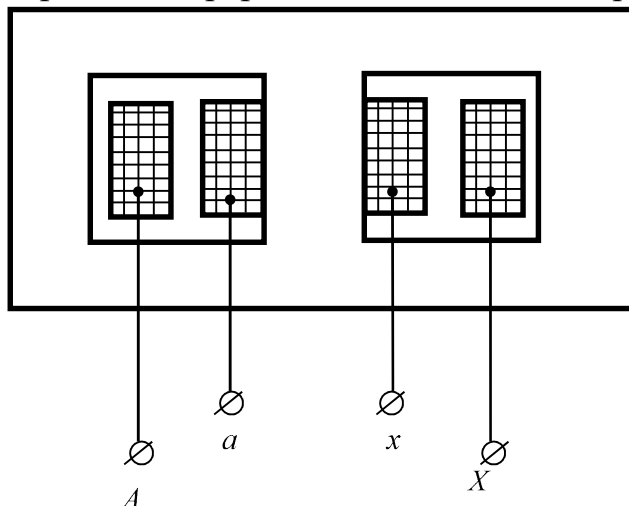
$$X'_2 = \frac{I_2^2 X_2}{I'^2_2} = \frac{k^2 I_2^2 X_2}{I_2^2} = k^2 X_2 \quad (6.24)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Z'_2 &= \sqrt{R'^2_2 + X'^2_2} = k^2 z_2 \\ Z'_n &= k^2 Z_n \end{aligned} \right. \quad (6.25)$$

Вектор магнітного потоку Φ відстає по фазі від вектора \dot{E}'_2 на кут $\pi/2$. Вектор струму холостого ходу \dot{I}_{1x} випереджує вектор Φ на кут втрат δ . З вектором \dot{I}_{1x} складається вектор \dot{I}'_2 і виходить вектор струму в первинній обмотці \dot{I}_1 . Вектор напруги первинної обмотки знаходиться [див. (11.8)] як сума векторів \dot{E}_1 , вектора спади напруги на активному опорі первинної обмотки $R_1\dot{I}_1$ (відкладається із кінця вектора \dot{E}_1 паралельно вектору \dot{I}_1) і вектора спаду напруги на індуктивному опорі розсіювання $jX_{\delta 1}\dot{I}_1$ (відкладається із кінця вектора $R_1\dot{I}_1$ і випереджає вектор струму \dot{I}_1 на кут $\pi/2$).

Приклад 6.3. Трансформатор броньового типу має номінальну потужність $S_{ном} = 100 \text{ кВА}$ (мал. 6,14) і напруги $U_1/U_2 = 5000/400 \text{ В}$. Діюче значення напруги на один виток $U_{вит.} = 4,26 \text{ В}$, частота мережі 50 Гц .

Визначити: 1. Числа витків обох обмоток трансформатора W_1 і W_2 ; 2. Переріз проводів обмоток S_1 і S_2 , якщо густина струму $I = 3,2 \text{ А/мм}^2$; 3. Чистий поперечний переріз сталюого магнітопроводу S_{cm} , якщо індукція



$$B_m = 1,4 \text{ Тл} .$$

Розв'язання:

$$W_1 = \frac{U_1}{U_{вит}} = \frac{5000}{4,26} = 1173;$$

$$W_2 = \frac{U_2}{U_{вит}} = \frac{400}{4,26} = 94;$$

Номінальні струми

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{U_1} = \frac{100 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3} = 20 \text{ А};$$

$$I_{2ном} = \frac{I_{ном}}{U_2} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} = 250 \text{ А};$$

Переріз проводів обмоток:

$$S_1 = \frac{I_{1ном}}{J} = \frac{20}{3.2} = 6.25 \text{ мм}^2$$

$$S_2 = \frac{I_{2ном}}{J} = \frac{250}{3.2} = 78.12 \text{ мм}^2$$

Магнітний потік і поперечний переріз магнітопроводу:

$$\Phi = \frac{U_{вит}}{4.44 f} = \frac{4.26}{4.44 * 500} = 0.0192 \text{ Вб}$$

$$S_{cm} = \frac{\Phi}{B_m} = \frac{0,0192}{1,4} = 0,0137 \text{ м}^2 = 137 \text{ см}^2.$$

6.7.1. Передумови складання схеми заміщення.

В електричних колах обмотки обмотки трансформаторів пов'язані між собою магнітним полем, це ускладнює розрахунки кола і аналіз його роботи. Через це для одержання чисельних співвідношень і дослідження робочого процесу трансформатора доцільно замінити трансформатор деякою еквівалентною ємкісною схемою, яка називається схемою заміщення. схема заміщення зводиться до зміни електромагнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками зв'язком електричним.

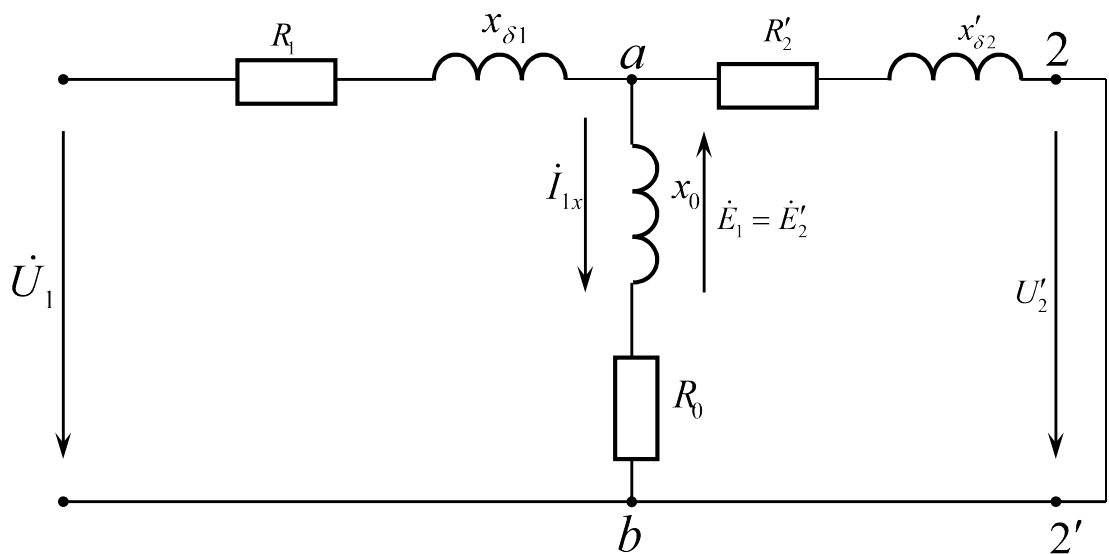


Рис. 6.15 Т-подібна електрична схема заміщення трансформатора

6.7.2. Електрична схема заміщення для приведенного трансформатора.

Приведений трансформатор математично описується рівнянням електричного стану (6.18), (6.19) і рівнянням струму (6.16).

У відповідності з цими рівняннями на рис. 6.15. побудована т-подібна електрична схема заміщення трансформатора.

На схемі R_1 і $x_{\delta 1}$ відповідно - активний опір і розсіювання первинної обмотки; R'_2 і $x'_{\delta 2}$ - приведені активний опір і розсіювання вторинної

обмотки; R_0 і x_0 – активний і реактивний опори вітки холостого ходу, аналогічні опорам R і x_L котушки (див. п.4.2.3.3).

Потужність втрат в опорі R_0 для струму I_{1x} еквівалентна втратам в магнітопроводі, тобто $R_0 I_{1x}^2 = \Delta P_{ст}$, x_0 – еквівалентний реактивний опір. Спад напруги на вітці холостого ходу з комплексним опором $z_0 = R_0 + jx_0$ для струму I_{1x} дорівнює ЕРС E_1 і E_2 трансформатора.

Основною цінністю схеми заміщення є те, що при правильно підібраних елементах схеми R і x вона дає можливість аналізувати і розраховувати всі режими трансформатора, переконаємося в цьому на прикладі. Якщо в схемі заміщення залишити розімкнутим вторинне коло, то струм I_2 буде дорівнювати нулю, а струм I_1 буде дорівнювати I_{1x} , тобто ми отримаємо режим холостого ходу. В такому разі схема заміщення фактично одного первинного кола. Якщо ж замкнути вторинне коло накоротко, то ми отримаємо короткого замикання трансформатора. Вмикання вторинного кола на різні за величиною опори навантаження будуть давати в схемі заміщення проміжні режими трансформатора від холостого ходу до короткого замикання.

6.7.3. Спрощення схема заміщення.

На практиці параметри схеми заміщення трансформатора експериментально знайти важко. В цілому ряді випадків можна користуватися без шкоди для точності рішення поставленої задачі спрощеною схемою заміщення трансформатора. Така спрощена схема заміщення може бути отримана, якщо знехтувати струмом холостого ходу трансформатора I_{1x} з огляду на те, що він становить для повного навантаження дуже невелику частку номінального струму первинної обмотки $I_{1н}$. Це рівносильно припущення, що $I_1 = I'_2$. В такому разі в схемі заміщення випадає вітка намагнічування і схема приймає вигляд показаний на рис. 6.16.

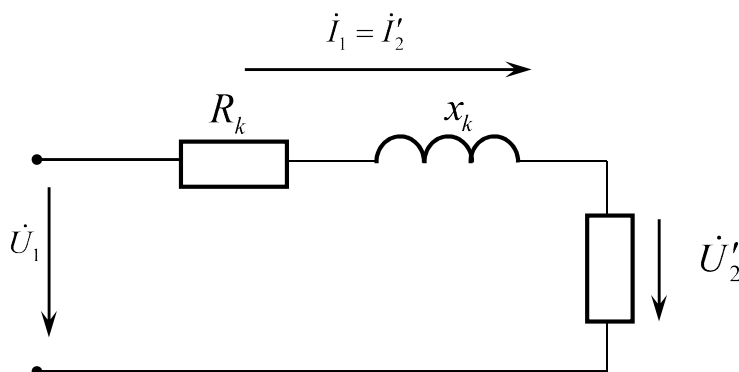


Рис. 6.16 Спрощена схема заміщення трансформатора

На рис. 6.16 R_k і x_k - об'єднані однорідні опори які називаються опорами короткого замикання:

$$R_k = R_1 + R'_2,$$

$$x_k = x_1 + x_2'$$

Повний опір такої схеми

$$z_k = \sqrt{R_k^2 + x_k^2} \quad (6.2.6)$$

6.8. Досліди холостого ходу і короткого замикання.

6.8.1. Мета дослідів.

Досліди холостого ходу і короткого замикання проводяться для визначення коефіцієнта трансформації; втрат в трансформаторі (в міді проводів обмоток і в сталі магнітопроводу) і параметрів схеми заміщення.

6.8.2. Дослід холостого ходу.

Для однофазного трансформатора дослід холостого ходу виконується за схемою рис. 6.17. До первинної обмотки підводиться номінальна напруга $U_{1,ном}$, до вторинної – підключений вольтметр V_2 , маючий досить великий опір. Практично можна вважати що струм $I_2=0$.

Крім того, в схему включений амперметр PV_1 і ватметр PW . Амперметр показує струм холостого ходу I_{1x} , вольтметр PV_1 – номінальну напругу первинної обмотки $U_{1,ном}$, вольтметр PV_2 – напруги $U_{x2} = U_{2,ном}$ і ватметр PW – потужність втрат для холостого ходу P_x . За цими показаннями можна визначити коефіцієнт трансформації.

$K=U_{1,ном}/U_{2,ном}$ для знижувального трансформатора або $K=U_{2,ном}/U_{1,ном}$ для підвищувального трансформатора. Так як навантаження відсутнє ($I_2=0$), то потужність, яку показує ватметр, – це потужність втрат в сталі трансформатора (магнітопроводі). Потужністю втрат в проводах обмоток можна знехтувати так як для дослідів холостого ходу струм вторинної обмотки дорівнює нулю, а струм в первинній обмотці – струм холостого ходу складає приблизно 5 % від номінального. Можна також знайти $\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_{1,ном} I_{1x}}$ (6.2.7) і повний опір кола (див. рис. 6.15): $z_x = \frac{U_{1,ном}}{I_{1x}}$.

Активний опір кола

$$R_x = R_1 + R_0 = \frac{P_x}{I_{1x}^2}$$

і індуктивний опір кола

$$x_{\delta x} = x_{\delta 1} + x_0 = \sqrt{z_k^2 + R_k^2} .$$

Так як практично опори $R_1 \ll R_0$ і $x_{\delta 1} \ll x_0$, то значення R_0 і x_0 визначається із приведених формул.

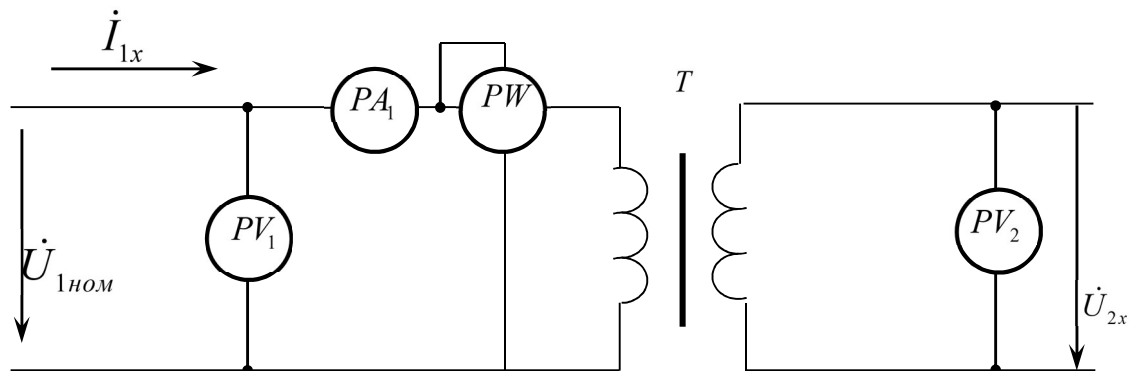


Рис. 6.17 Схема дослід холостого ходу

6.8.3. Дослід короткого замикання.

Дослід короткого замикання виконується за схемою, представленою за рис. 6.18, за умови, що до первинної обмотки підводиться знижена напруга U_{1k} , що складає 5-10% $U_{1ном}$, а точніше така напруга, при якій струми I_1 і I_2 в обмотках дорівнюють номінальним значенням $I_{1ном}$, $I_{2ном}$. Вторинна обмотка трансформатора закорочена через амперметр PA_2

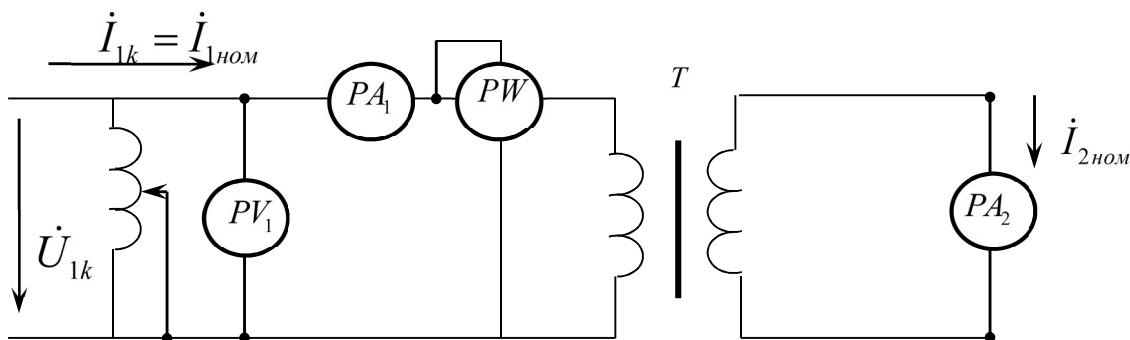


Рис. 6.18 Схема дослід короткого замикання.

У цьому досліді вольтметр PV_1 показує напругу первинної обмотки U_{1k} , ватметр W – потужність короткого замикання P_k , амперметр PA_1 – струм в первинній обмотці. За цими показниками можна визначити потужність втрат в обмотках, так як втрати в магнітоводі складають лише 0,005-0,1 втрат від номінального режиму із-за зниженої напруги U_{1k} . Потужність втрат для короткого замикання і номінальних струмах

$$P_{k.ном.} = R_1 * I_{1ном}^2 + R_2 * I_{2ном}^2 \quad (6.28)$$

Крім того, за даними цього дослідження можна знайти параметри спрощеної схеми заміщення (рис.6.19) Повний опір короткого замикання

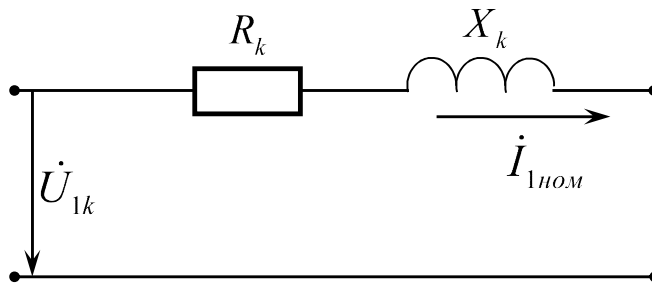
$$z_k = U_{1k} / I_{1ном}$$

сумарний активний опір обох обмоток

$$R_k = R_1 + R'_2 = P_{k.ном.} / I_{1ном}^2$$

і реактивний опір

$$x_k = x_1 + x'_2 = \sqrt{z_k^2 - R_k^2}$$



6.8.4. Напряга короткого замикання

Як впливає із схеми заміщення (рис. 6.19.)

$$U_{1k} = z_k I_{1ном} \quad (6.29)$$

Зазвичай U_{1k} складає 5-8% $U_{1ном}$:

$$U_{1k\%} = \frac{z_k I_{1ном}}{U_{1ном}} * 100$$

Значення $U_{k\%}$ зазначено на щитку трансформатора. Активна складова напруги короткого замикання знаходиться за формулою

$$U_{ak\%} = \frac{z_k I_{1ном}}{U_{1ном}} * 100 = \frac{P_{кном}}{S_{ном}} * 100 \quad (6.30)$$

а реактивна складова напруги короткого замикання

$$U_{pk\%} = \frac{R_k I_{1ном}}{U_{1ном}} * 100 \quad (6.31)$$

Процентні значення напруги U_k , U_{ak} , U_{pk} пов'язані між собою співвідношенням

$$U_k = \sqrt{U_{ak}^2 + U_{pk}^2} \quad (6.32)$$

Приклад 6.4. Для однофазного підвищувального трансформатора типу ТМ потужністю $S_{ном} = 4000$ кВа на напругу 10/35 кВ досліди холостого ходу і короткого замикання показали:

$$U_{1х} = 1000 \text{ В}; I_{1х} = 20 \text{ А}; P_x = 6,7 \text{ кВт};$$

$$U_k = 750 \text{ В}; I_k = 400 \text{ А}; P_k = 33,5 \text{ кВт}.$$

Визначити активні і реактивні опори обох обмоток в припущенні рівності приведення значень опорів, а також визначити інші постійні схеми заміщення.

Розв'язання.

1. Опори короткого замикання дорівнюють

$$z_{ik} = \frac{U_{ik}}{I_{1k}} = \frac{750}{400} = 1,87 \text{ Ом}; R_{1k} = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2} = \frac{3350}{400^2} = 0,2 \text{ Ом}.$$

$$x_{1k} = \sqrt{z_{1k}^2 - R_{1k}^2} = \sqrt{1,87^2 - 0,2^2} = 1,9 \text{ Ом}.$$

2. В припущенні рівності приведених опорів

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{ik}}{2} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ Ом},$$

$$x_1 = x_2' = \frac{x_{ik}}{2} = \frac{1,9}{2} = 0,95 \text{ Ом}.$$

3. Коефіцієнт трансформації трансформатора,

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{35}{10} = 3,5 ; R_2 = R_2' K^2 = 0,1 * 3,5^2 = 1,23 \text{ Ом};$$

$$x_2 = x_2' * K^2 = 0,95 * 3,5^2 = 11,6 \text{ Ом}.$$

4. Для холостого ходу

$$z_x = \frac{U_{1x}}{I_{1x}} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi_{1x} = \frac{P_{1x}}{U_{1x} * I_{1x}} = \frac{6700}{1000 * 20} = 0,335 ; \varphi_{1x} = 70^{\circ} 42' ;$$

$$Y_x = \frac{1}{z_x} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ См};$$

$$g_x = y_x \cos \varphi_{1x} = 0,02 * 0,335 = 0,0067 \text{ См}$$

$$b_x = y_x * \sin \varphi_{1x} = 0,02 * 0,9397 = 0,018 \text{ См}$$

6.9. Вторинна напруга трансформатора

6.9.1. Вторинна напруга.

Важливе значення має напруга на виводах вторинної обмотки трансформатора, так як до цієї обмотки під'єднуються навантаження. При зміні навантаження в процесі роботи напруга трансформатора U_2 не залишається сталою, вона змінюється залежно від величини струму і характеру навантаження.

Наприклад, якщо напруга на лампах освітлення занижена, то вони горять тьмяно; якщо напруга живлення асинхронних двигунів менше номінальної на 10 %, то обертаючий момент двигуна зменшиться майже на 20 % і такий момент може бути недостатнім для робочої машини, яку призводить в рух електродвигун; занижена напруга якого-небудь автоматичного вимикача може негативно позначитися на його роботі. Через це важливо вміти знати напругу живлення обладнання, що підключається до вторинної обмотки трансформатора.

6.9.2. Зміна вторинної напруги.

Зміну вторинної напруги визначають у відсотках

$$\Delta U \% = \frac{U_{2ном} - U_2}{U_{2ном}} * 100 = \frac{U_{1ном} - U_2'}{U_{1ном}} * 100 \quad (6.33)$$

Формулу для визначення $\Delta U\%$ можна одержати із векторної діаграми рис.6.20, побудованої для спрощеної схеми заміщення рис.6... Практично з допустимою похибкою можна вважати, що $OC=OM$ і $CB=MB$. Тоді $OM-OA=AK+KM$. Із прямокутних трикутників AKB і MKB випливає, що у відповідному масштабі $AK = R_k I_1 \cos \varphi_2$, $KM = x_k I_1 \cos \varphi_2$ і $U_{1ном} - U'_2 = R_k I_1 \cos \varphi_2 + x_k I_1 \sin \varphi_2$.

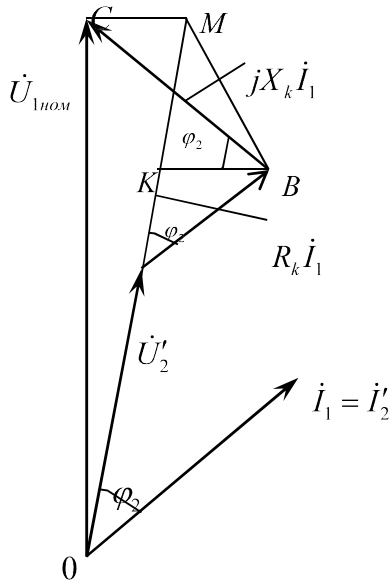


Рис. 6.20 Векторна діаграма спрощеної схеми заміщення трансформатора.

Введемо поняття коефіцієнта навантаження трансформатора

$$\beta = I_1 / I_{1ном} = I_2 / I_{2ном}$$

Після підстановки двох останніх в (6.33) одержимо:

$$\Delta U\% = \beta \frac{R_k I_{1ном}}{U_{1ном}} * 100 \cos \varphi_2 + \beta \frac{x_k I_{1ном}}{U_{1ном}} * 100 \sin \varphi_2$$

або з урахуванням (6.30 і 6.31)

$$\Delta U\% = \beta (U_{a.k} \cos \varphi_2 + U_{p.k} \sin \varphi_2) \quad (6.34)$$

Якщо значення $\Delta U\%$ знайдено, то вторинна напруга

$$U_2 = U_{2ном} \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100}\right) = U_{2x} \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100}\right) \quad (6.35)$$

Значення U_2 (для номінального навантаження) може бути знайдено за каталожними даними, де приводиться значення $\Delta U\%$.

Для сучасних трансформаторів процента зміна напруги лежить у межах 2-4%.

Із векторною діаграмою Рис.... видно, що напруга короткого замикання U_k є відхилення напруги від її номінального значення при номінальному струмі.

6.9.3. Зовнішня характеристика трансформатора

Зовнішня характеристика трансформатора являє собою залежність між вторинною напругою U_2 і струмом навантаження I_2 при заданій напрузі на вході трансформатора U_1 . Вона може бути розрахована за каталожними даними.

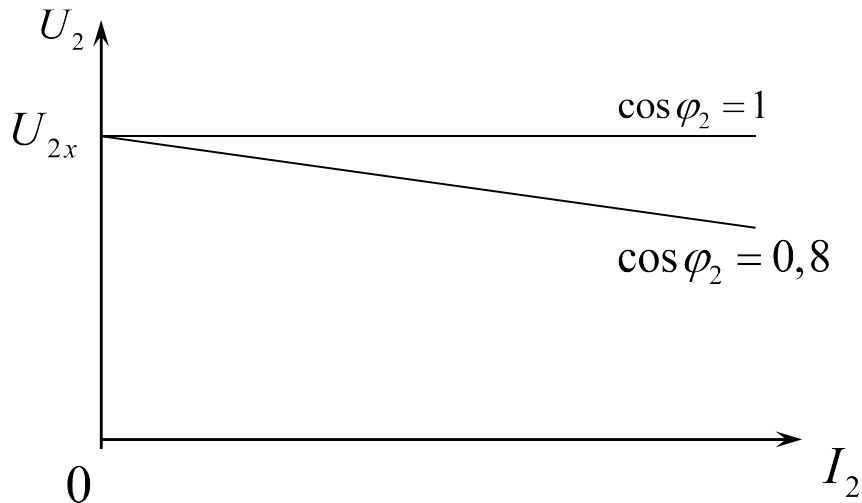


Рис. 6.21 Зовнішні характеристики трансформатора: за активним навантаженням $\cos \varphi_2 = 1$ і активно-індуктивному $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Зовнішні характеристики за активним і активно-індуктивному навантаженні приведені на рис. (6.21)

Чим більше навантаження, тобто чим більший струм I_2 , тим менша напруга U_2 . В межах від холостого ходу до номінального навантаження, тобто від $I_2 = 0$ до $(0 \leq \beta \leq 1)$, напруга U_2 змінюється лише до декілька відсотків. Чим більше навантаження, тим більші струми I_2 і I_1 , а значить, більше і спад напруги на опорах обмоток трансформатора і, отже, тим менше напруга U_2 .

6.10. Втрати потужності і ККД трансформатора

6.10.1. Втрати постійні і змінні.

Рівняння балансу потужності в колі з трансформатором.

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + \Delta P_{cm} + \Delta P_m \quad (6.36)$$

Де P_1 — активна потужність, що надходить із мережі живлення (від джерела); $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ — активна потужність споживачів; $\Delta P = \Delta P_{cm} + \Delta P_m$ — сумарна потужність втрат в трансформаторі; ΔP_{cm} — потужність втрат в сталі (магнітопроводі); ΔP_m — потужність втрат в проводах обмоток.

Потужність втрат в сталі магнітопроводу із-за гістерезиса і вихрових струмів ΔP_{cm} залежить від амплітуди магнітного потоку Φ_m , а так як $\Phi_m = const$, то потужність втрат в сталі не змінюється, тобто не залежить від навантаження для постійного значення напруги живлення U_1 . Ці втрати складають 1-2% номінальної потужності. На практиці втрати в сталі визначають експериментально з досліду холостого ходу (рис.6.17).

Потужність втрат в проводах обмоток залежить від навантаження, так як $\Delta P_m = R_k I_1^2 /$

Залежність втрат в сталі і міді від коефіцієнти навантаження β показана на рис.6.22.

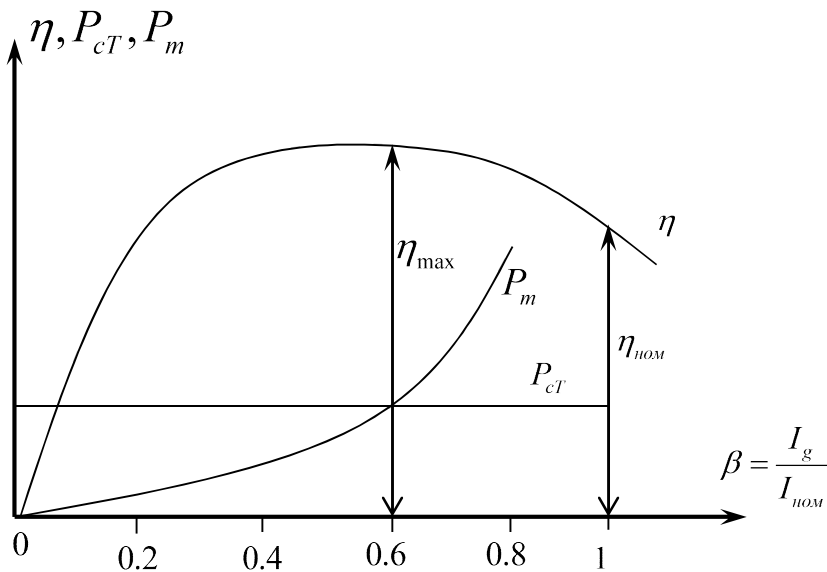


Рис. 6.22 Втрати і ККД трансформатора.

6.10.2. Коефіцієнт корисної дії трансформатора.

ККД трансформатора – це відношення корисної потужності P_2 до всієї підведеної P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{cm} + \Delta P_m} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_{cm} + \Delta P_m} .$$

Так як коефіцієнт навантаження $\beta = I_1 / I_{1ном} = I_2 / I_{2ном}$ і в дослідах холостого ходу і короткого замикання (див. 6.9.2) було одержано, що $\Delta P_{mc} = P_x$, а $\Delta P_m = P_k I_1^2 = \beta^2 R_k I_{1ном}^2 = \beta^2 P_{к.ном}$, то ККД

$$\eta = \frac{\beta * S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (6.37)$$

6.10.3. Залежність ККД трансформатора від навантаження.

Із (6.37) можна знайти значення коефіцієнта навантаження β при якому ККД буде максимальним.

Порівнявши нулю похідну $d\eta/d\beta$, одержимо:

$$\beta_{\text{опт}}^2 P_{\text{к.ном}} = P_x$$

Це означає що ККД η максимальний при рівності потужностей втрат в проводах обмоток і в сталі. Отже, оптимальний коефіцієнт навантаження

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_x / P_{\text{к.ном}}}$$

Зазвичай для трансформаторів $P_x / P_{\text{к.ном}} = 0,5 \div 0,25$ і, значить, $\beta_{\text{опт}} = 0,7 \div 0,5$. Таким чином, найбільше значення ККД трансформатора буде при навантаженні 50-70 % номінального. Залежність ККД від навантаження, побудована згідно (6.37), показана на рис. 6.22.

Загальна номінальна потужність установлених силових трансформаторів в мережах електропостачання у 4-6 разів перевищує потужність генераторів електростанцій, тому ККД трансформаторів має важливе значення для раціонального використання енергетичних ресурсів країни.

Номінальне значення ККД внаслідок відсутності обертових деталей дуже високе і лежить в межах 98-99 % для потужних трансформаторів, а в трансформаторах малої потужності – 50-70 %.

6.11. Трифазні трансформатори.

6.11.1. Загальні відомості.

Перетворення електричної енергії трифазного струму однієї напруги в енергію трифазного струму іншої напруги можна виконати двома способами:

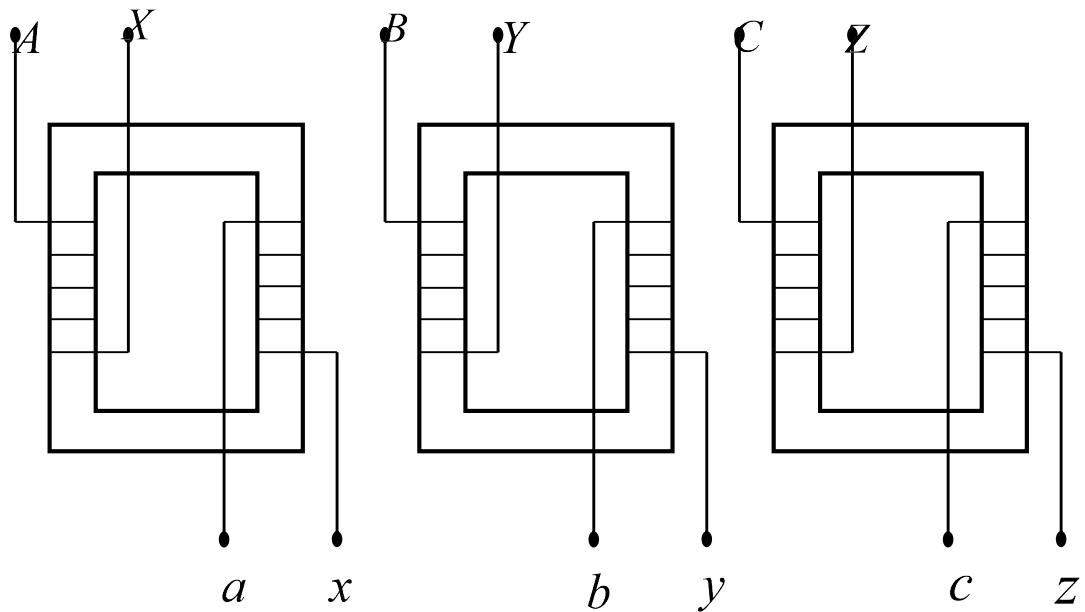
а) за допомогою трьох однотипних однофазних трансформаторів (рис. 6.23,а);

б) за допомогою одного трифазного трансформатора (рис. 6.23,б).

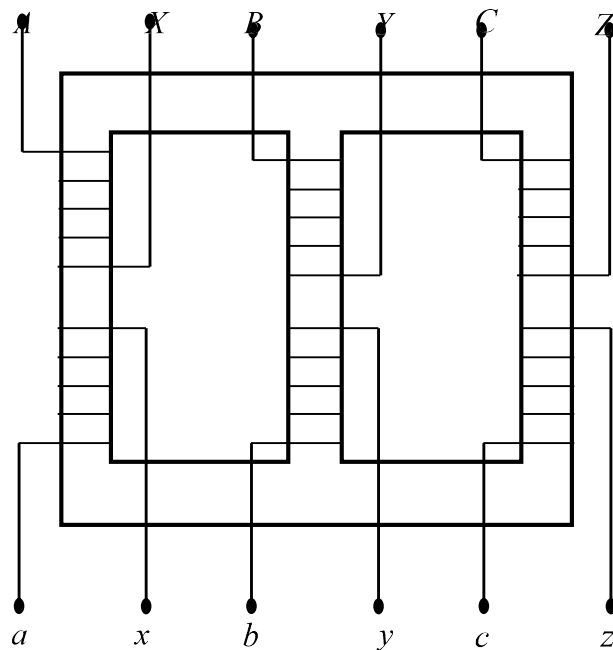
Трифазні (тристержньові) трансформатори виконують середньої і малої потужності, а групу з трьох однофазних трансформаторів застосовують при великих потужностях. В обох випадках обмотки фаз вищої і нижчої напруг можуть з'єднуватися зіркою або трикутником. З'єднання зіркою позначається знаком \dot{A} , а трикутником – Δ . Якщо обидві обмотки з'єднані зіркою, то таке з'єднання позначається. В чисельнику вказується спосіб з'єднання обмоток фаз вищої напруги, а в знаменнику низької напруги – буквами а, в і с, а їх кінці – буквами х, у, z.

В теперішній час в енергетиці використовують три основні схеми з'єднання:

Для трансформаторів невеликої потужності (до 1000 кВа) 10/0,4, 6/0,4 і 10/0,66 кВ застосовують групи з'єднання обмоток, бо на стороні низької напруги треба мати виведену нульову (нейтральну) точку.



a)



б)

Рис. 6.23 Способи трансформування трифазного струму:
а) – трьома однофазними трансформаторами
б) – одним трифазним трансформатором

З'єднувати обмотки зіркою слід при високих напругах, оскільки фазна напруга в $\sqrt{3}$ раз менша за лінійну, що дає можливість зменшити вимоги до ізоляції обмоток.

З'єднання трикутником застосовують при низьких напругах і великих струмах, що дає можливість зменшити переріз проводів обмоток,

оскільки в цьому разі фазний струм у проводах обмотки менший у $\sqrt{3}$ раз за лінійний струм.

На щитку трансформаторів зазначено не тільки спосіб з'єднання обмоток, а й умовні позначення групи з'єднання обмоток трансформаторів.

Кут зсуву фаз між напругами домовились позначати, користуючись годинниковим способом позначення кута. Для цього вектор U_{ab} первинної лінійної напруги вважають за велику стрілку годинника і встановлюють проти цифри 12 годинникового циферблата, а вектор U_{AB} вторинної лінійної напруги вважають за малу стрілку годинника і встановлюють на циферблаті відповідно до схеми з'єднання обмоток. За одиницю кутового зміщення взято кут 30° , що відповідає куту між двома сусідніми цифрами годинникового циферблата.

6.11.2. Група з'єднання обмоток.

Розглянемо два основних види з'єднання обмоток і накреслимо векторні діаграми для цих випадків:

1. З'єднання обмоток

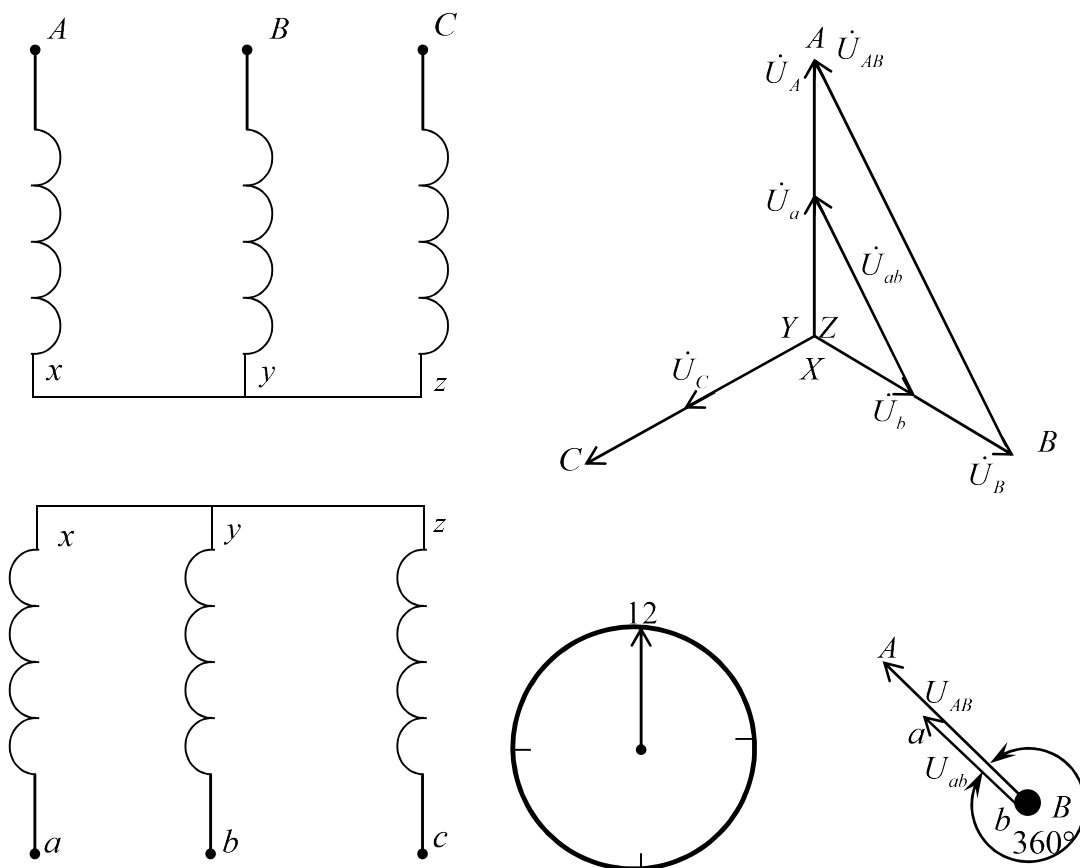


Рис. 6.24 Визначення групи з'єднань обмоток трансформатора за допомогою векторної діаграми.

2. З'єднання обмоток

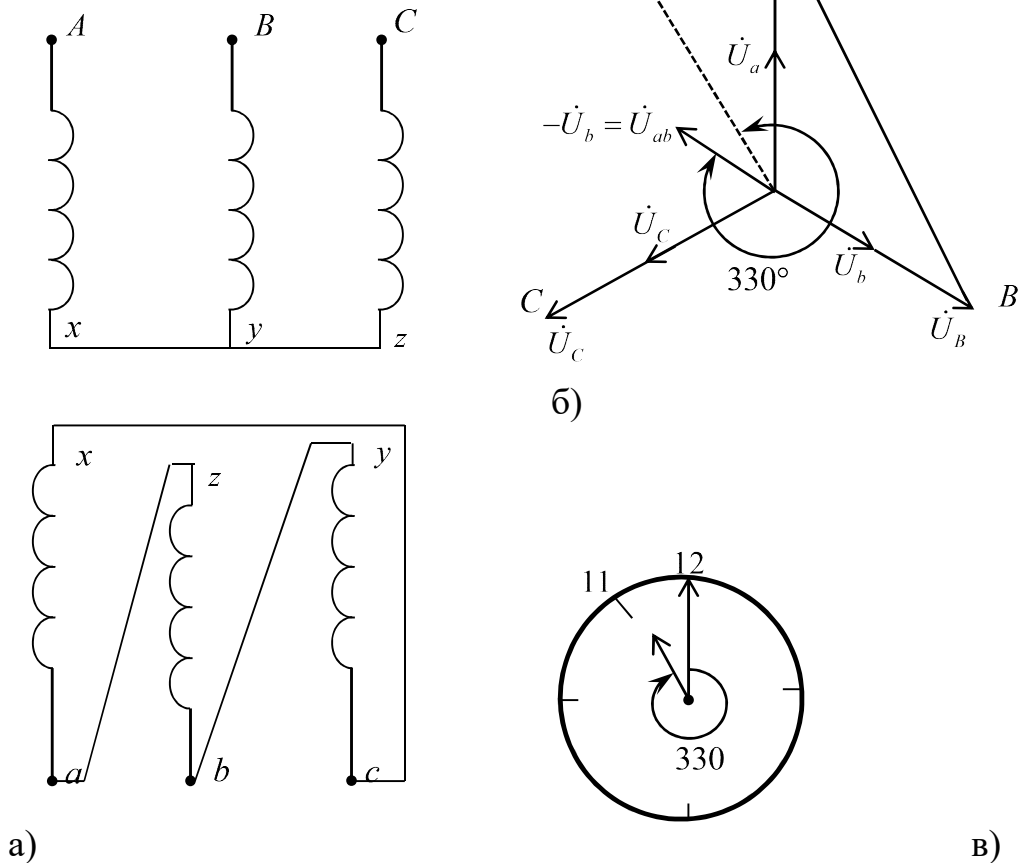


Рис.6.25 Визначення групи з'єднання обмоток трансформатора за допомогою діаграми при з'єднанні обмоток

При побудові векторних діаграм виходять з таких загальних міркувань:

1. Векторні фази напруг обох обмоток однієї фази паралельні, тому що індуктуються одним магнітним потоком, і при узгодженому вмиканні обмоток спрямовані в одну сторону, а при їх зустрічному вмиканні - в різні сторони. При узгодженому вмиканні обидві обмотки намотані в один бік; можна верхні затискачі вважати за початки, а нижчі - за кінці. Щоб було зустрічне вмикання обмоток, досить поміняти місцями затискачі первинної або вторинної обмотки, як показано на рис. 6.26. За схемою рисунка 6.26,а обмотки з'єднані напруги \dot{U}_A і \dot{U}_a , \dot{U}_{AB} і \dot{U}_{ab} і т.д. знаходяться проти фази (рис. 6.26, б), тобто зсунуті за фазою відносно одна одної на кут 180° .

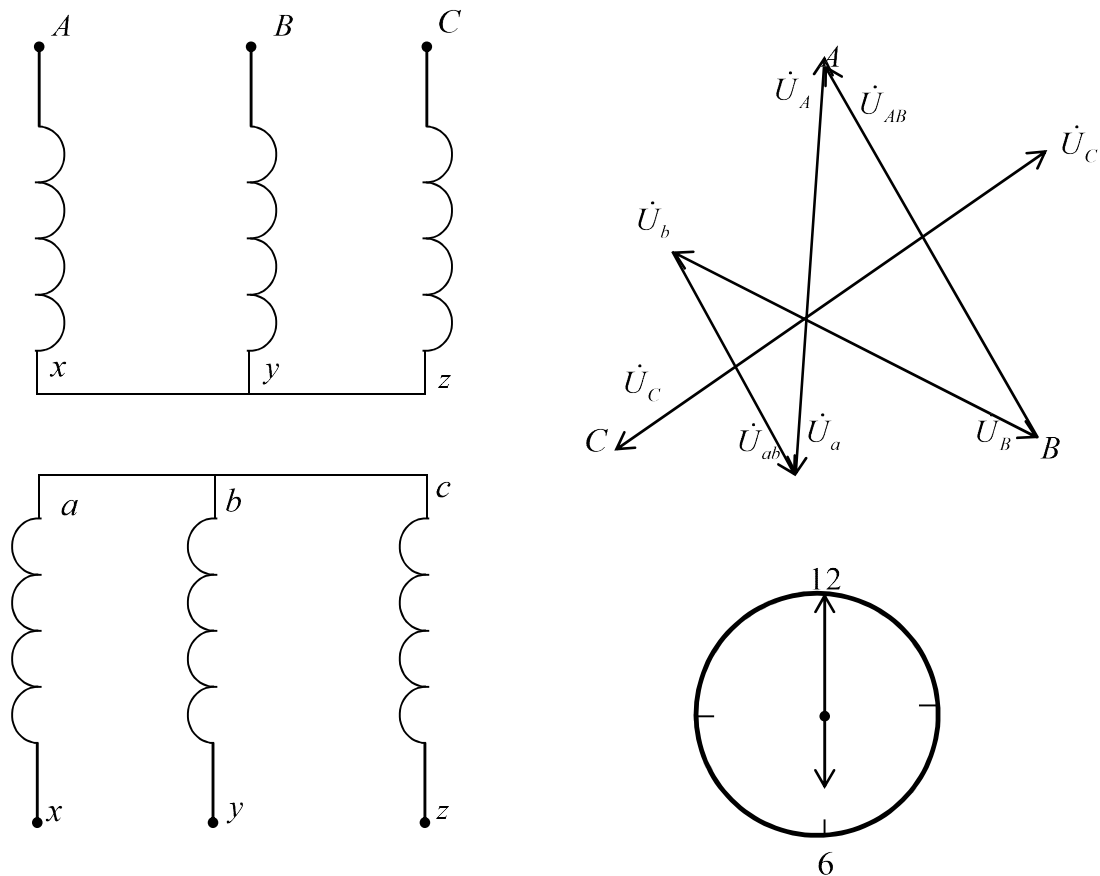


Рис. 6.26 Визначення групи з'єднання обмоток трансформатора при зустрічному їх вмиканні.

Отже, група зєднання обмоток трансформаторів показує зсув фаз між високою і низькою лінійними напругами. Групу зєднання трансформаторів треба знати при вмиканні їх на паралельну роботу.

Процеси, що відбуваються в кожній фазі трифазного трансформатора нічим не відрізняються від процесів в однофазному трансформаторі.

Коефіцієнт трансформації визначається через лінійні напруги позначається на щитку трансформатора $K = U_{л1} / U_{л2}$.

Приклад 6.5. Визначити коефіцієнт трансформації к трифазного трансформатора і номінальні діючі значення первинного і вторинного фазних $U_{1фном}$, $U_{2фном}$ напруг, для з'єднання обмоток відповідно за схемами "зірка-зірка" і "зірка-трикутник". Первинна обмотка має число витків на фазу $W_1 = 2002$, вторинної $W_2 = 134$. Номінальна лінійна напруга первинної обмотки $U_{1лном} = 6000$ В.

Розв'язання.

1. Коефіцієнт трансформації фазних напруг трансформатора $K = W_1 / W_2 = 2002 / 134 = 15$.

2. Номінальна первинна фазова напруга трансформатора:

$$U_{1\text{фном}} = \frac{U_{1\text{лном}}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{1,73} = 3470 \text{ В.}$$

3. Номінальні вторинні напруги трансформатора для з'єднання трансформатора для з'єднання обмоток за схемою («зірка-зірка»):

$$\text{лінійна } U_{2\text{лном}} = \frac{U_{1\text{лном}}}{K} = \frac{6000}{15} = 400 \text{ В.}$$

$$\text{фазна } U_{2\text{фном}} = \frac{U_{\text{флном}}}{K} = \frac{400}{1,73} = 230 \text{ В.}$$

4. Коефіцієнти трансформації трансформатора при з'єднуванні обмоток за схемою:

лінійних

фазних

5. Коефіцієнти трансформації трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою («зірка-трикутник»):

$$\text{фазних } K_{\Delta\phi} = U_{1\text{фном}} / U_{2\text{фном}} = 3470 / 230 = 15$$

$$\text{лінійних } K_{\Delta l} = U_{1\text{лном}} / U_{2\text{лном}} = 600 / 230 = 26,$$

$$\text{так як при цьому } U_{2\text{лном}} = U_{2\text{фном}}.$$

Приклад 6.6. Дані трифазного трансформатора слідуєчі: номінальна потужність $S_{\text{ном}} = 320$ кВа; вища напруга $U_1 = 6000$ В; нижча напруга $U_2 = 230$ В; група з'єднання – 11; частота мережі $f = 50$ Гц.

Визначити найбільше значення ККД і потужність, при якій він виходить, якщо втрати холостого ходу $P_x = 1,7$ кВт, а втрати короткого замикання $P_k = 5,7$ кВт.

Розв'язання. Коефіцієнт корисної дії трансформатора для будь-якого навантаження можна представити у такому вигляді

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + \beta^2 P_{\text{ел}}} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k},$$

де β – коефіцієнт завантаження трансформатора ($I_g / I_{\text{ном}}$);

$P_c \approx P_x$ – втрати в сталі (магнітопроводі) трансформатора;

$P_{\text{ел.}} \approx P_k$ – втрати електричні в мідних проводах обмоток трансформатора.

Щоб отримати найбільше значення ККД, необхідно взяти похідну від цього виразу за зміною β і прирівняти похідну нулю:

$$\frac{d\eta}{d\beta} = \frac{S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 (\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k) - \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 (S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2\beta P_k)}{(\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k)^2} = 0$$

$$\text{звідки } P_x = \beta^2 P_k.$$

Із одержаного виразу видно, що ККД трансформатора досягає найбільшого значення в тому разі, коли змінні втрати дорівнюють

постійним, тобто електричні втрати в обмотках трансформатора дорівнюють втратам у сталі.

Отже, для нашого трансформатора ККД досягає найбільшого значення при

$$\beta = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}} = \sqrt{\frac{1700}{5700}} = 0,546 ,$$

тобто при 54,6% номінального навантаження.

Номінальний струм первинної обмотки:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{U_{1ном}} = \frac{320 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} = 53 \text{ А.}$$

54,6 % від 53 А складає 29 А, отже при навантаженні 29 А ККД трансформатора буде мати найбільше значення.

Потужність, що віддається трансформатором для $\cos \varphi_2 = 1$,

$$P_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2 = 0,546 \cdot 320 \cdot 10^3 \cdot 1 = 174700 = 174,7 \text{ кВт.}$$

ККД для коефіцієнта потужності $\cos \varphi_2 = 1$.

$$\eta_1 = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} = 1 - \frac{P_x + \beta^2 P_k}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k} = 1 - \frac{2P_x}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + 2P_x} =$$

$$= 1 - \frac{2 \cdot 1700}{0,546 \cdot 320 \cdot 10^3 \cdot 1 + 2 \cdot 1700} \approx 0,981$$

або $\eta_1 = 98,1\%$

Потужність, що віддається трансформатором для $\cos \varphi_2 = 0,8$,

$$P_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2 = 0,546 \cdot 320 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 139800 \approx 140 \text{ кВт.}$$

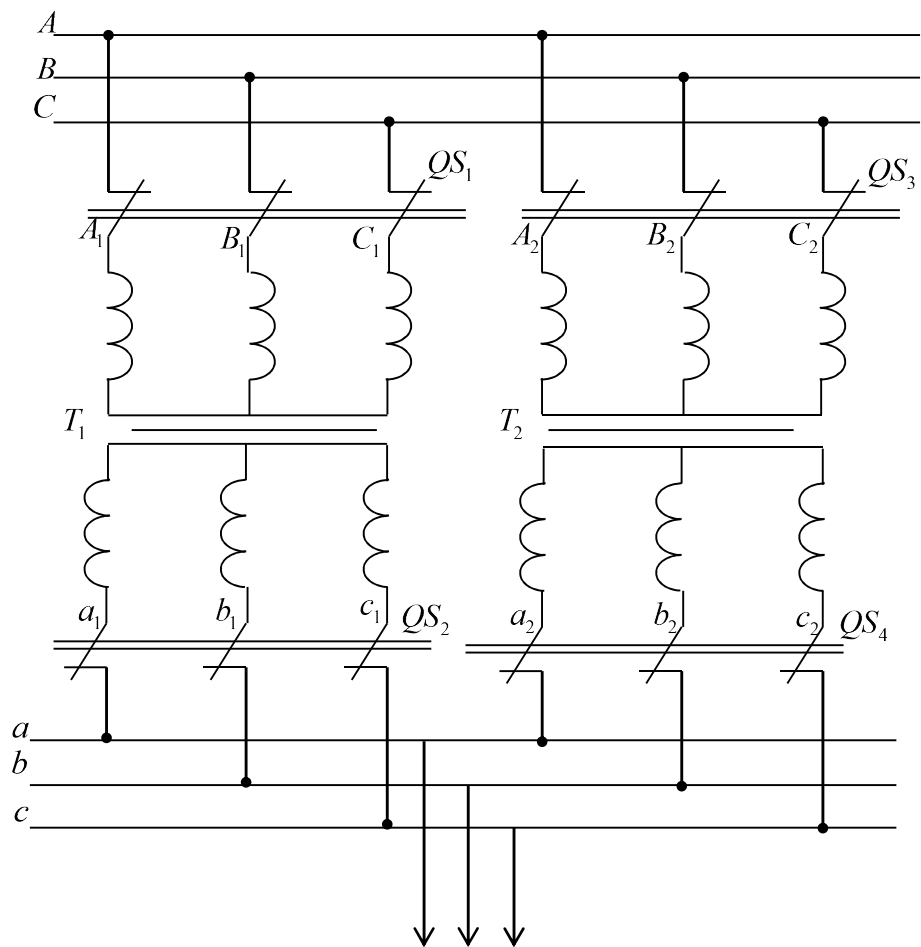
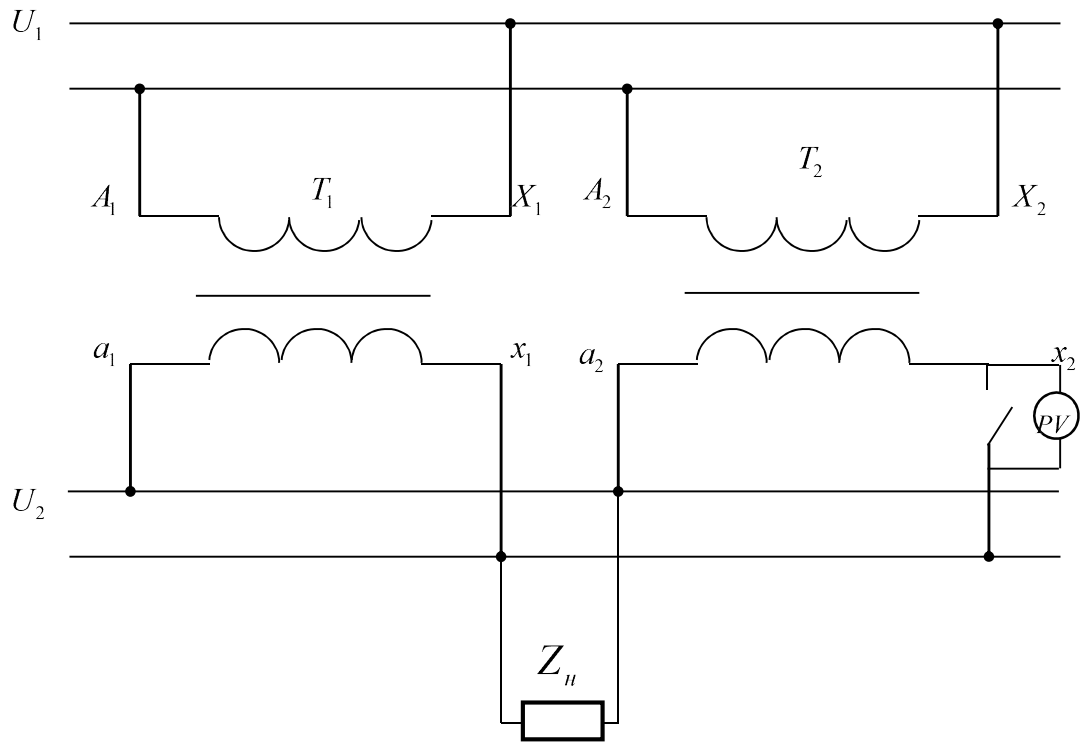
$$\eta_2 = 1 - \frac{2P_x}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + 2P_x} = 1 - \frac{2 \cdot 1700}{0,546 \cdot 320 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 1700} \approx 0,976$$

або $\eta_2 = 97,6\%$

6.12. Паралельна робота трансформаторів.

6.12.1. Необхідність паралельної роботи.

Паралельною роботою називається робота двох або більше трансформаторів застосовують якщо вимагається передавати більшу потужність ніж номінальна потужність одного трансформатора. Для декількох паралельно працюючих трансформаторів можливо без зменшення необхідної для споживачів потужності виконувати регламентні роботи та ремонтувати трансформатори, що виходять із ладу; мати резерв у разі виходу із ладу окремих трансформаторів, відключати частину трансформаторів за змінним графіком навантаження підстанції (з метою зменшення втрат), рівномірно розподіляти навантаження між трансформаторами. Ці переваги призвели до широкого розповсюдження паралельної роботи трансформаторів.



6.12.2. Умови паралельної роботи

Для того, щоб трансформатори T_1 і T_2 могли бути включені паралельно, необхідно виконати наступні умови:

1. На вторинній стороні трансформаторів повинні бути однакові напруги, тобто $U_{2вт.} = U_{2пер.}$ ця умова забезпечується рівністю коефіцієнтів трансформації, тобто $K_2 = K_1$.

2. Необхідна рівність відсоткових напруг короткого замикання, тобто $U_{к2} = U_{к1}$. При здійсненні цієї умови трансформатори, експлуатовані за паралельним включенням, зможуть нести навантаження, пропорційним їх номінальним потужностям. На практиці допускають розходження напруг короткого замикання не більш як $\pm 10\%$.

Припустимо, що два трансформатори однакової потужності, які мають різні коефіцієнти трансформації, увімкнені на паралельну роботу. При цьому вважаємо, що друга умова паралельного вмикання дотримана. Якщо $K_1 < K_2$, то під впливом різниці ЕРС $\Delta E = E_{21} - E_{22}$, по обмотках трансформаторів потече зрівнювальний струм $I_{зр.}$, тому що обидві обмотки магнітно зв'язані між собою. Оскільки повні опори трансформаторів дуже малі, то навіть при невеликій різниці в коефіцієнтах трансформації під впливом ΔE зрівнювальний струм може бути таким великим, що нормальна робота буде неможливою. На практиці допускають різницю в коефіцієнтах трансформації не більше як $0,5\%$.

3. Для з'єднання вторинних обмоток трансформаторів треба з'єднувати затискачі з однаковими потенціалами, тобто вторинні напруги повинні збігатися за фазою відносно зовнішнього кола, а відносно внутрішнього кола вони повинні бути зсунуті на 180° .

Вимикач SA (рис. 6.27,а) можна вмикати лише тоді, коли стрілка вольтметра PV стоїть на нулі. Крім того, рекомендується, щоб відношення потужностей трансформаторів не перевищувала 3:1.

4. Щоб увімкнути трифазні трансформатори на паралельну роботу (рис. 6.27,б), треба, крім зазначених вище умов, дотримувати, ще й такої: щоб трансформатори належали до однієї групи з'єднання обмоток. В разі вмикання на паралельну роботу трансформаторів трифазного струму з рівними групами з'єднання, між обмотками трансформаторів виникне велика різниця потенціалів, внаслідок чого потечуть неприпустимі за величиною зрівнювальні струми.

Так наприклад, при з'єднанні груп кут зсуву фаз між однойменними ЕРС (напругами) складає 30° і, як показують розрахунки, зрівнювальний струм буде у 5 разів більше номінального.

Для дотримання всіх умов паралельної роботи трансформаторів слід вмикати затискачі вторинних обмоток на спільні шини з однаковими потенціалами. Для цього первинні обмотки обох трансформаторів вмикають до фаз мережі ABC (рис. 6.27,б). Вторинну обмотку одного з трансформаторів вмикають на збірні шини а,в,с; вторинну обмотку другого трансформатора

вмикають лише одним будь-яким затискачем до відповідної шини, наприклад контакт вимикача QS4 а₂ до шини а. Між затискачами в₂-в і с₂-с вимірюють напругу. Якщо стрілка вольтметра зупиниться на нулі, то це покаже, що кути зсуву фаз між первинними і вторинними напругами однакові, і затискачі в₂ і с₂ можна вмикати на паралельну роботу. Якщо вольтметр покаже певну напругу, то вмикання їх на паралельну роботу неможливе. При цьому слід з'єднати два інших виводи вторинних обмоток і знову шукати вольтметром затискачі з однаковими потенціалами.

Приклад 6.7. Паралельно включені три трансформатора, що мають слідуєчі потужності і напруги короткого замикання:

перший трансформатор $S_1 = 1800$ кВа; $U_{k1} = 6,5\%$;

другий трансформатор $S_2 = 3200$ кВа; $U_{k1} = 7\%$;

третій трансформатор $S_3 = 5600$ кВа; $U_{k1} = 7,5\%$.

Як розподілиться між ними сумарна потужність $S = 10600$ кВа і на скільки відсотків буде навантажений кожен трансформатор?

Розв'язання. 1. Приведемо напруги короткого замикання всіх трансформаторів до потужності першого трансформатора:

$$U'_{k1} = U_{k1} \frac{S_1}{S_1} = 6,5 \frac{1800}{1800} = 6,5\%$$

$$U'_{k2} = U_{k2} \frac{S_1}{S_2} = 7 \frac{1800}{3200} = 3,94\%$$

$$U'_{k3} = U_{k3} \frac{S_1}{S_3} = 7,5 \frac{1800}{5600} = 2,41\%$$

Приведена потужність $S' = \frac{S}{K_1}$,

$$\text{де } K_1 = \frac{1}{U'_{k1}} + \frac{1}{U'_{k2}} + \frac{1}{U'_{k3}} = \frac{1}{6,5} + \frac{1}{3,94} + \frac{1}{2,41} = 0,823 ;$$

$$S' = \frac{S}{K_1} = \frac{10600}{0,823} = 12880 \text{ кВа.}$$

3. Навантаження між трансформатором розподілиться слідуєчим чином: для першого трансформатора

$$S'_1 = \frac{S'}{U'_{k1}} = \frac{12880}{6,5} = 1981 \text{ кВа, тобто перевантаження на } 10,1\%.$$

для другого трансформатора

$$S'_2 = \frac{S'}{U'_{k2}} = \frac{12880}{3,94} = 3269 \text{ кВа, тобто перевантаження на } 2,15\%;$$

для третього трансформатора

$$S'_3 = \frac{S'}{U'_{k3}} = \frac{12880}{2,41} = 5350 \text{ кВа, тобто недовантаження на } 4,46\%.$$

Звідси

$$S = S'_1 + S'_2 + S'_3 = 1981 + 3269 + 5350 = 10600 \text{ кВа.}$$

6.13. Спеціальні типи трансформаторів

6.13.1. Зварювальні трансформатори

Пересувні зварювальні трансформатори невеликої потужності призначені для ручного електродугового зварювання металів, мають широке застосування при виконанні будівельно-монтажних та ремонтних робіт. Як правило, вони виготовляються однофазними з повітряним охолодженням; із боку високої напруги можуть бути ввімкнені в мережу 380 або 220В, а на боці низької напруги – у зварювальному колі – вони мають напругу 60-65В. Для сталого горіння дуги у зварювальну мережу необхідне вмикання індуктивного опору. В зв'язку з цим зварювальні трансформатори випускають або в комплекті з окремою дросельною котушкою – регулятором, або з регулятором, вбудованим в корпус трансформатора.

На рис. 6.28, а показана схема вмикання зварювального трансформатора типу ЗТЕ з окремим регулятором. Як видно зі схеми, регулятор вмикається послідовно з вторинною обмоткою трансформатора. Він являє собою індуктивну котушку зі сталевим осердям (дросель). Осердя – магнітопровід дроселя – має повітряний зазор, ширина якого може змінюватися шляхом переміщення рухомої частини осердя при обертанні рукоятки регулятора. Зміна повітряного зазору змінює індуктивний опір дроселя і тим самим регулює – збільшує і зменшує – зварювальний струм. Трансформатори типу ЗТЕ виготовляють потужністю до 34 кВА зі зварювальним струмом до 500 А.

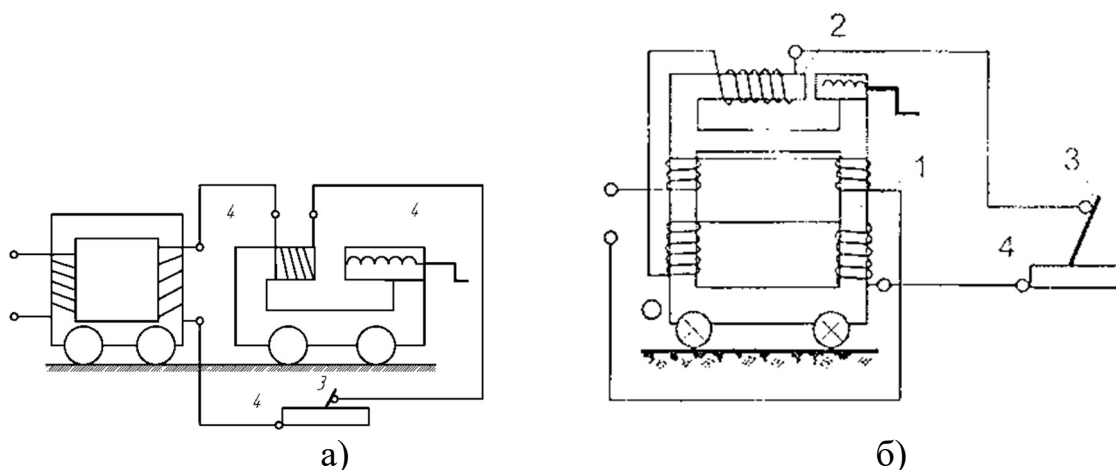


Рис. 6.28 Схеми вмикання зварювальних трансформаторів типу ЗТЕ (а), ЗТН (б): 1 – трансформатор; 2 – регулятор струму; 3 – зварювальний електрод; 4 – плита

У виробництві використовуються конструкції зварювальних трансформаторів типу ЗТН та інші з регулятором (регульовальним

дроселем), вбудованим у корпус трансформатора. Схема такого пристрою подана на рис. 6.28, б.

Своєрідною конструкцією володіють зварювальні трансформатори з рухомими обмотками. До них відносяться трансформатори типу ТЗ і ТЗК, схематичний пристрій яких показано на рис. 6.29. Первинна їх обмотка 1, розташована на одному стержні зі вторинною 2, може переміщуватися відносно неї за допомогою гвинта 3 і гайки, запресованих в планку кріплення обмотки. Регулювання зварювального струму в цих трансформаторів відбувається зміною відстані між первинною і вторинною обмоткою (гвинтом з рукояткою, показаних на рис. 6.29).

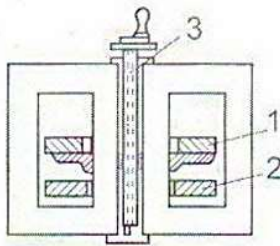


Рис. 6.29 Схематичний вигляд зварювального трансформатора типу ТЗ: 1 – первинна обмотка; 2 – вторинна обмотка; 3 – гвинт з гайкою

При збільшенні відстані обмоток одна від другої збільшується їх індуктивний опір і відповідно зменшується зварювальний струм. Окремого регулятора (дроселя) для них непотрібно. Трансформатори типу ТЗ і ТЗК виготовляють на зварювальні струми до 500А. У трансформаторів ТЗК є вбудований конденсатор, який забезпечує підвищення коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) при його роботі.

6.13.2. Автотрансформатори

Автотрансформатором називається трансформатор, який має лише одну обмотку з одним або кількома проміжними виводами (рис.6.30). При вмиканні його в мережу живлення в обмотці з числом витків w_1 буде індукватися ЕРС.

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m .$$

На ділянці обмотки з числом витків w_2 ЕРС

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m .$$

З цих рівнянь одержимо

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k .$$

Таким чином, між ЕРС у автотрансформаторі існує таке саме співвідношення, як і у трансформаторах.

Автотрансформатори бувають однофазні та трифазні.

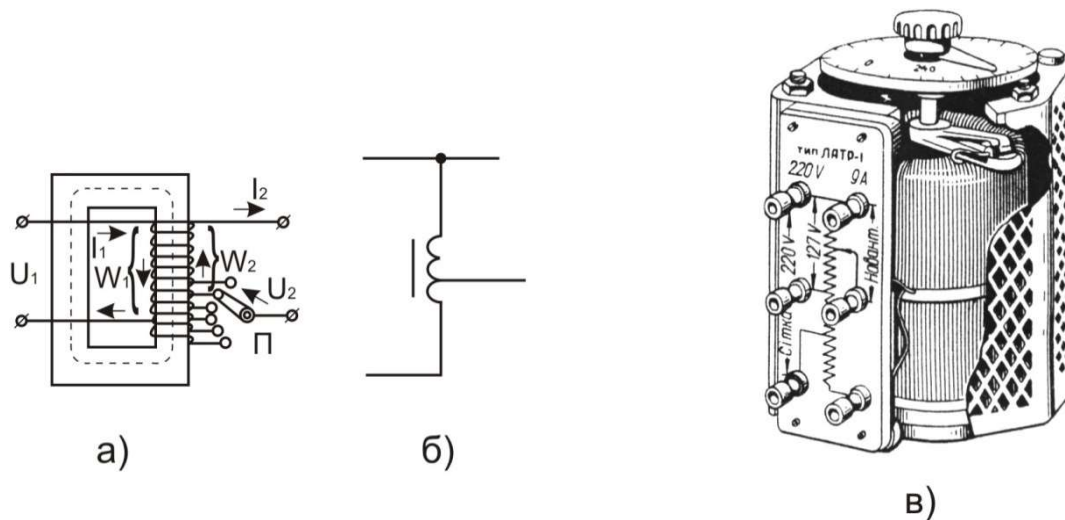


Рис. 6.30. Автотрансформатор: а) – схема будови автотрансформатора; б) – умовне позначення; в) – автотрансформатор типу ЛАТР-1

Основна перевага автотрансформатора перед трансформатором тієї ж потужності та напруги – кращий ККД і менша втрата міді для виготовлення обмоток, оскільки у спільній частині обмотки проходить струм $I = I_2 - I_1$ (знижувального трансформатора) або $I = I_1 - I_2$ (підвищувального трансформатора). Завдяки цьому спільну частину обмотки виготовляють із дроту меншого перерізу (при невеликому коефіцієнті трансформації). При коефіцієнті трансформації $k=2$ економія дроту становить 50 %, а при $k=20$ – всього лише 5 %.

Основний недолік автотрансформаторів полягає в тому, що первинна і вторинна обмотки електрично з'єднані.

Автотрансформатори малої потужності застосовуються для пуску асинхронних двигунів, живлення випрямлячів, у лабораторних установках. У лабораторіях широко застосовуються спеціальні регульовальні автотрансформатори двох типів: ЛАТР-1 (на струм до 9А) і ЛАТР-2 (на струм до 2А). Кожен з них розрахований на напругу мережі 127 і 220В і дає змогу регулювати напругу споживача від 0 до 250В. Загальний вигляд автотрансформатора типу ЛАТР-1 наведено на рис.6.12,в.

Приклад 6.6. Обмотка автотрансформатора має $W_1 = 1200$ витків і включена в мережу напругою $U_1 = 500В$. Яку напругу можна одержати у вторинному колі, якщо між її кінцями ввімкнено 900 витків?

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad U_2 = \frac{U_1 W_2}{W_1} = \frac{500 * 900}{1200} = 375В$$

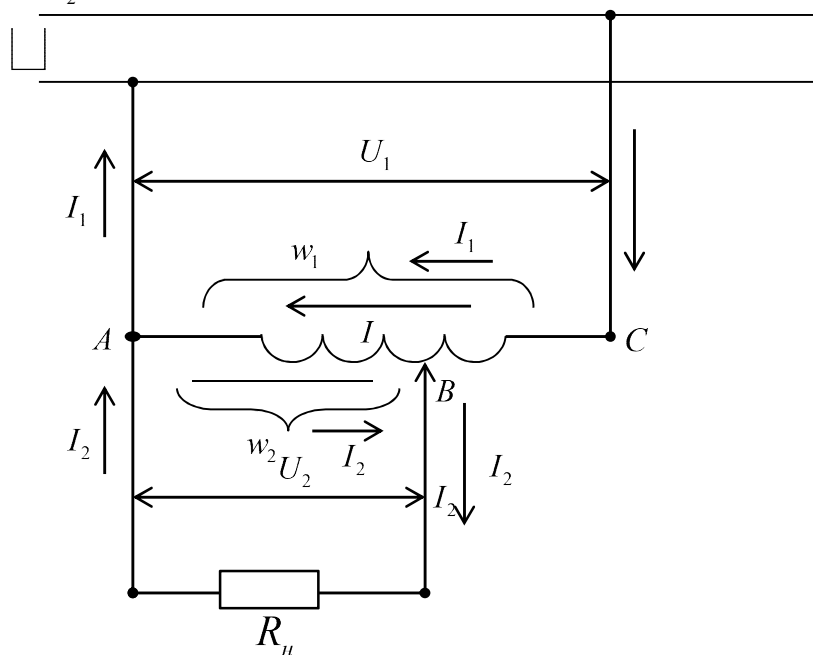
Приклад 6.7. Автотрансформатор ввімкнений в мережу напругою $U_1 = 400\text{В}$ Струм $I_1 = 30\text{А}$ у вторинному колі напруга $U_2 = 300\text{В}$. Вимагається визначити струм у вторинній обмотці I_2 .

Спочатку визначаємо потужність первинного кола P_1 .

$$S_1 = I_1 U_1 = 30 * 400 = 12000\text{ВА} = 12\text{kВА}$$

Нехтуючи незначними втратами в автотрансформаторі одержимо потужність вторинного кола також 12 кВА; за умови,що вторинне коло не утримує індуктивність,струм I_2 буде дорівнювати:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12000}{300} = 40\text{А} .$$



По загальній частині витків А-В протікає різниця струмів I_2 і I_1

$$I = I_2 - I_1 = 40 - 30 = 10\text{А} .$$

Отже, на ділянці А-В переріз проводу можна взяти меншим,ніж в решті частині обмотки. За цих умов звичайний трансформатор для зниження напруги з 400 до 300 В мав би дів обмотки,тобто більші витрати міді і велику вартість.

Якщо у нашому прикладі вторинна напруга U_2 замість 300 В буде 350 В,тобто не на багато відрізняється від первинної напруги,то вторинний струм буде:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12000}{350} = 34.3\text{А} .$$

У цьому випадку на ділянці А-В потече ще менший струм $I = I_2 - I_1 = 34.3 - 30 = 4.3\text{А} .$

І переріз проводу обмотки на ділянці А-В можна взяти ще меншим. Із цього зробимо висновок,що чим менше вторинна напруга відрізняється

від первинної, тим більша перевага автотрансформатора перед звичайним трансформатором.

Спробуємо змінити вторинну напругу U_2 з 300 на 200 В. Зараз вторинна напруга буде у два рази менша первинної. Вторинний струм буде:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12000}{200} = 60 A$$

Струм на ділянці А-В буде :

$$I = I_2 - I_1 = 60 - 30 = 30 A ,$$

Тобто такий же, як і струм I_1 . Отже , переріз провідника для всієї обмотки повинен бути однаковим.

Спробуємо ще зменшити вторинну напругу U_2 до 100 В. Зараз вона буде відрізнятись більше чим у 2 рази від первинної напруги.

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12000}{100} = 120 A$$

Струм на ділянці А-В у цьому разі буде:

$$I = I_2 - I_1 = 120 - 30 = 90 A$$

Зараз переріз проводів в обмотці на ділянці А-В доведеться збільшувати порівняно з ділянкою В-С. В цьому разі може виявитися більш вигідним поставити звичайний трансформатор.

6.13.3. Знижувальні трансформатори для переносних світильників (з лампами розжарювання) і роботи електрифікованих інструментів

За правилами техніки безпеки для переносних світильників в умовах промислового виробництва допускається напруга не більше 42 В, а в містах особливо небезпечних у відношенні враження електричним струмом (траншеї, тунелі, криниці, металеві резервуари, всередині корпусів технологічного обладнання і інші) – не більше 12 В.

У зв'язку з чим для живлення таких світильників (переносних електроламп) промисловістю випускаються спеціальні переносні знижувальні однофазні трансформатори невеликих розмірів з вторинною напругою 42, 36 і 12 В, потужністю від 50 до 250 ВА (тобто до 0,25 кВА). Первинна їх обмотка вмикається в мережу напругою 220 або 380 В.

Електрифікований інструмент при виконанні ремонтних чи будівельно-монтажних робіт рекомендується (з міркувань техніки безпеки) використовувати на напругу 36 і 42 В. При необхідних заходах обережності (робота в гумових рукавицях) допускаються також інструменти, що працюють на напругах 127 і 220 В.

Для живлення електроінструментів промисловістю випускаються переносні трифазні знижувальні трансформатори з первинною напругою 380 В, потужністю від 0,5 до 2,5 кВА. Вони знижують напругу до 36, 42, 133 і 230 В.

Треба мати на увазі, що користуючись переносними трансформаторами, під час роботи вторинна обмотка (знижувальна) трансформатора повинна бути заземлена чи занулена.

6.13.4. Вимірювальні трансформатори

При необхідності вимірювання напруги і струму, обліку споживання електроенергії (живлення кіл лічильників) в колах напругою вище 1000 В застосовують вимірювальні трансформатори напруги і струму. Вимірювальні прилади, що приєднуються до вторинних обмоток цих трансформаторів, ізолюються тим самим від високої напруги і одночасно досягається безпека обслуговування цих приладів.

Трансформатори напруги являють собою звичайні знижувальні трансформатори, трифазні та однофазні, але тільки дуже малої потужності: від $0,05$ до $0,4\text{ кВА}$. Первинна обмотка, що складається з великої кількості витків порівняно тонкого дроту, під'єднується до затискачів мережі, напругу якої необхідно вимірювати чи контролювати.

Вторинна обмотка має меншу кількість витків більш товстого дроту, до затискачів якої під'єднуються вимірювальні прилади: вольтметри, частотоміри, паралельні обмотки ватметрів, обмотки лічильників, схеми захисту мереж чи електрообладнання та інші.

Коефіцієнт трансформації трансформаторів напруги підбирається завжди так, щоб при нормальній величині напруги, на яку розрахована первинна обмотка, від вторинної обмотки одержувалось би 100 В . (У мережах вище 1000 В всі апарати обліку і захисту розраховані на 100 В).

Схема будови трансформатора напруги показана на рис. 6.31. Вольтметр, що призначений для постійної спільної роботи з даним трансформатором напруги, то на його шкалі нанесено значення первинної напруги, наприклад, 6 кВ . (Вторинна напруга буде 100 В).

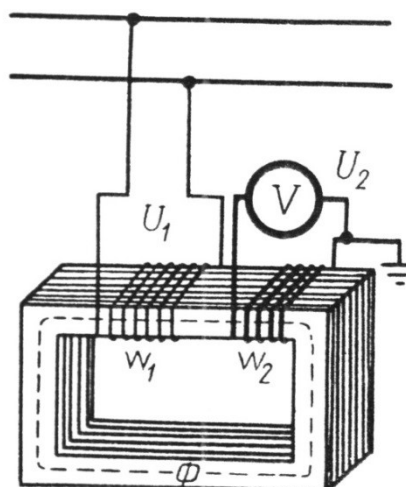


Рис. 6.31. Схема вмикання вимірювального трансформатора напруги

Один кінець вторинної обмотки трансформатора і кожух заземляються для безпеки обслуговування установки, оскільки при пошкодженні ізоляції первинної обмотки вторинна обмотка і приєднані до неї вимірювальні прилади зможуть опинитись під високою напругою.

Вторинну обмотку трансформатора напруги замикати накоротко не можна, тому що можуть згоріти обидві обмотки.

Трансформатори струму слугують не тільки для ізоляції вимірювальних приладів від високої напруги, але і для зменшення струму в колах приладів. Через це трансформатори струму застосовують і в установках напругою до $1000V$ при вимірюванні великих струмів.

Будова трансформаторів струму основана на відомому правилі, що струми в обмотках будь-якої трансформатора обернено пропорційно числу витків у них; у первинних обмотках трансформаторів струму мала кількість витків w_1 (може бути один), у вторинних – відповідно більше w_2 . Відношення w_2/w_1 називається коефіцієнтом трансформації трансформатора струму. При цьому всі трансформатори струму розраховуються таким чином, щоб при проходженні в первинній їх обмотці номінального струму, тобто струму, на який даний трансформатор розрахований, у його вторинній обмотці протікав струм, величиною $5A$. Коефіцієнти трансформації трансформаторів струму можуть бути різними: $20/5$; $30/5$; $100/5$; $300/5$; $800/5$ і інші.

На рис.6.32 показана схема вмикання трансформатора струму. Первинна обмотка трансформатора струму, як уже відмічалось, має невелику кількість витків товстого дроту або шини, по яких проходить вимірювальний струм. Вторинна обмотка має велику кількість витків дроту, розрахована на номінальний струм $5A$, замикається на амперметр, струмові кола ватметрів, фазометрів, лічильників і т.д.

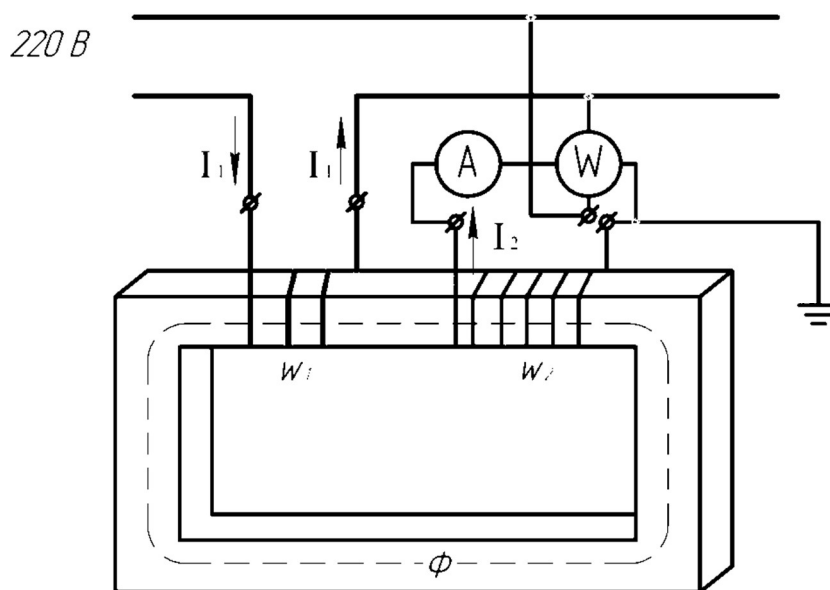


Рис. 6.32. Схема вмикання вимірювального трансформатора струму

Коефіцієнт трансформації трансформатора струму дорівнює відношенню сили струму в первинній обмотці до сили струму у вторинній обмотці:

$$k = \frac{I_1}{I_2}.$$

Вимірювальна сила струму

$$I_1 = kI_2.$$

Трансформатори струму працюють при вторинній обмотці, замкненій на малий опір приладів. Якщо розімкнути вторинну обмотку, то в ній буде індукуватись велика ЕРС, яка може спричинити пробій ізоляції і викликати загорання ізоляції. Крім того, на кінцях розімкненої обмотки з'являється висока напруга, небезпечна для обслуговуваного персоналу. Тому при експлуатації не допускається розмикання вторинної обмотки трансформатора струму при замкненій первинній. Перед вмиканням трансформатора струму у високовольтне коло один затискач вторинної обмотки і кожух трансформатора заземляють, щоб при пошкодженні ізоляції вторинне коло не могло одержати високий потенціал відносно землі.

На рис.6.33 показані умовні графічні позначення трансформатора струму на електричних схемах.

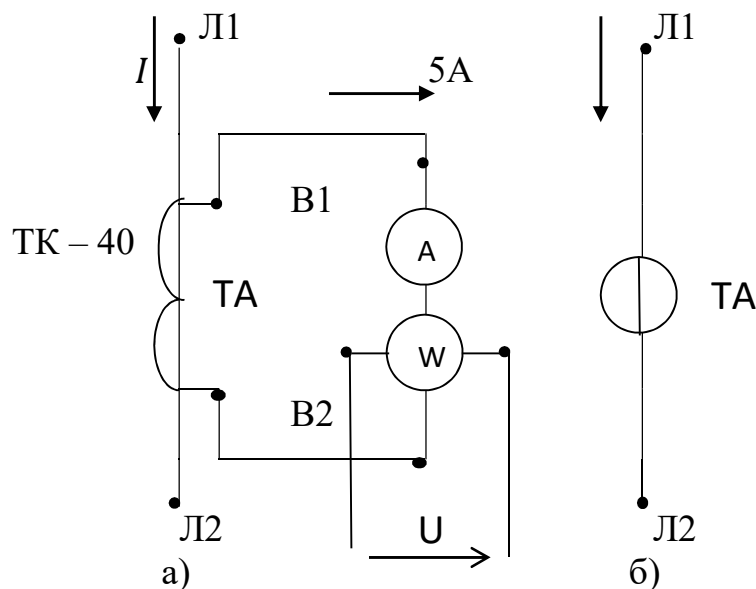


Рис. 6.33. Умовне графічне позначення трансформатора струму.
а) з приладами вимірювання струму і потужності;
б) загальне позначення в однолінійних схемах

ТК-40 – трансформатор котушковий на струм 40/5А, для кола напругою до 1000В.

В1 і В2 – затискачі вторинної обмотки трансформатора струму для підключення вимірювальних приладів (амперметрів).

Л1 і Л2 – затискачі для підключення первинної обмотки трансформатора струму до струмоведучої лінії.

6.14. Пожежна небезпека трансформаторів та протипожежні заходи

6.14.1. Трансформатори з масляним охолодженням

Силові трансформатори в експлуатації є надійними апаратами. Пожежна небезпека цих трансформаторів обумовлюється наявністю в них горючої речовини – трансформаторного масла. Нагадаємо, що його температура самозаймання – 350-400°С, а теплотворна здатність дуже велика, то можна собі уявити яка виникне пожежа при наявності в трансформаторі декількох тонн або декількох десятків тонн такого масла.

Отже, маслянонаповнені трансформатори відносяться до вибухо- і пожежонебезпечних об'єктів. Трансформаторне масло являється швидко займистим матеріалом, через це всі роботи, пов'язані з ремонтом і періодичним обслуговуванням силових трансформаторів з використанням електропаяння, сушіння чи вогню близько до трансформатора, слід проводити дуже обережно, у відповідності з передбаченими протипожежними правилами з обов'язковим попередженням про такі роботи працівників пожежної охорони.

Забороняється в зоні, де відбуваються роботи, з відкритим трансформаторним маслом, або поблизу емностей, де воно зберігається, палити, розводити вогонь, користуватися газовими чи автогенними пальниками та іншими вогненебезпечними приладами.

Загорання в масляних трансформаторах в основному, відбувається через причини електричного характеру: виткові замикання в котушках обмоток, замикання на корпус (пробій ізоляції), міжфазні короткі замикання, обрив кола в обмотці трансформатора, «пожежа сталі», тощо.

Виткові замикання відбуваються головним чином через природне старіння і знос ізоляції, а також внаслідок перевантаження трансформатора або ж механічного пошкодження ізоляції при наскрізних замиканнях, що можуть виникнути через перенапругу під час грози.

Ізоляція обмоток трансформаторів, взагалі володіючи високою електричною міцністю, порівняно швидко руйнується, якщо їх температура перевищує відповідні допустимі значення. Досліди показують, що якщо трансформатор безперервно і довготривало буде працювати при температурі міді обмоток порядку 105°С, то його ізоляція буде повністю зруйнована протягом декількох років (при нормативних строках 20-25 років і більше).

Виткові замикання відбуваються також при такому зниженні рівня масла в трансформаторі, коли його обмотки оголяються.

Нарешті, виткові замикання відбуваються при наскрізних коротких замиканнях, коли внаслідок динамічних зусиль має місце деформація обмоток з механічним руйнуванням ізоляції. Зазвичай при цьому одночасно відбувається і замикання обмотки на корпус.

Ознаками виткового замикання в обмотці являються: підвищене нагрівання, іноді з характерним булькотінням масла (у трансформаторів, що не мають газового захисту), деяке збільшення струму на боці мережі живлення, а також різниця величин опорів постійному струмові окремих фаз трансформатора.

Перевіркою ізоляції мегаомметром виткове замикання виявити неможливо. Для цього необхідно обмотку вийняти із бака і подати на цю обмотку напругу величиною 10- 20% від номінальної напруги. При цьому в місці пошкодження з'являється дим, що йде із обмотки.

Замикання на корпус (пробивання) відбувається внаслідок старіння ізоляції, зволоження масла і зниження його рівня, а також при зовнішніх та внутрішніх перенапругах.

До зовнішніх перенапруг відносять атмосферні; вони виникають в результаті дії грозових розрядів. Якщо грозовий розряд виникає в безпосередній близькості від трансформатора або лінії, з якою він сполучений – то перенапруга виникає внаслідок індукційного впливу струму і заряду блискавки, таку перенапругу називають індукованою. Найбільш небезпечною для силових трансформаторів атмосферою перенапругою являється безпосередній удар блискавки (грому) в лінію або опору.

До внутрішніх або комутаційних, відносять перенапруги, що виникають при зміні режиму роботи трансформатора або в цілому системи, в якій він працює. Наприклад, при аварійних коротких замиканнях, вмиканні та вимиканні трансформаторів, ліній з великою індуктивністю та ємністю. Причиною такої перенапруги слугує різка зміна електромагнітних та електричних полів, котрі за нормальної роботи зрівноважені; у випадку раптової зміни режиму – їх рівновага стрибкоподібно порушується і призводить до небезпечного для ізоляції підвищення рівня напруги.

При замиканні на корпус, зазвичай спрацьовує газовий захист, а у трансформаторів із заземленою нейтраллю спрацьовує максимальний струмовий і диференціальний захист.

Міжфазні короткі замикання обмоток трансформатора є порівняно рідкісним видом пошкодження і виникають вони внаслідок тих самих причин, що і замикання на корпус. При міжфазному короткому замиканні відбувається викид масла та руйнування мембрани вихлопної труби. При цьому спрацьовують газовий і максимальний струмовий захист.

«Пожежа сталі» – це таке пошкодження сталі осердя, при якому через порушення ізоляції між окремими листами сталі або болтами, що їх стягують, виникають значні місцеві нагрівання сталі вихровими струмами. При розгортанні «пожежі сталі» температура масла різко зростає, і якщо не спрацює або відсутній газовий захист, виникає пожежа трансформатора.

6.14.2. Пожежа в трансформаторах

Пожежі трансформаторів, в основному, зводяться до двох видів:

а) внаслідок пошкодження і дугового перекриття одного із вводів трансформатора. Масло, що знаходиться всередині бака під тиском, із розширювача витікає і займається на кришці;

б) внаслідок тяжкого внутрішнього пошкодження обмоток, коли відбувається розрив бака або радіаторів і горюче масло трансформатора розливається по приміщенню або на відкритій підстанції.

Під час гасіння пожежі першого виду слід негайно вимкнути трансформатор із мережі всіма вимикачами (якщо він не вимкнута системою захисту) і вимкнути всі роз'єднувачі. Потім необхідно відкрити нижній кран, спустити масло дещо нижче рівня пошкодження і приступити до гасіння пожежі піногенератором або піногасником, або водою з використанням спеціальних розпилювачів, або накриванням брезентом. Бак трансформатора рекомендується при цьому поливати водою для охолодження масла.

У разі пожежі другого виду після вимикання трансформатора з усіх сторін – слід негайно спустити все масло з трансформатора в приймальну яму або маслостік і погасити горючі залишки масла. Гасіння пожежі проводиться за допомогою піно генератора або піногасником, водяним розпилювачем, а також піском.

Забороняється гасити горюче масло компактним водяним струменем, оскільки при цьому можливе розбризкування горючого масла і збільшення площі пожежі.

Електрообладнання, що знаходиться під напругою, слід гасити струмонепровідними засобами (сухим піском, вуглекислотою, бромистим етилом та ін.) .

У всіх випадках виникнення пожежі трансформатора негайно слід викликати пожежну команду. До прибуття пожежної команди керує гасінням на об'єкті старший черговий спеціаліст-електрик. З прибуттям пожежників він доповідає старшому про виконання перемикань та вжиті заходи для ліквідації пожежі.

У процесі гасіння необхідно давати консультації працівникам пожежної охорони щодо дотримання Правил технічної експлуатації та Правил техніки безпеки, можливого загоряння розташованої поряд апаратури і розповсюдження пожежі.

Під час пожеж трансформаторів, що встановлені в закритих приміщеннях, повинні бути прийняті заходи для попередження розповсюдження вогню через вентиляційні та інші канали. Робоча та аварійна вентиляції повинні бути ввімкненими.

Запитання та завдання для самоконтролю

1. Чим обумовлена необхідність підвищення і зниження напруги в електричних мережах?
2. Загальні відомості про силові трансформатори, приведіть схему передачі електроенергії від електростанції, де вона виробляється до споживачів напругою 0,4 кВ.
3. Поясніть будову та принцип дії однофазного трансформатора.
4. Що таке коефіцієнт трансформації і як він визначається?
5. Приведіть основні параметри силових трансформаторів та поясніть їх практичне значення.
6. Поясніть причину зміни первинного струму силового трансформатора під час зміни навантаження приєднаного до його вторинної обмотки.
7. Для чого проводяться досліди холостого ходу і короткого замикання?
8. Яким чином визначається температура нагрівання працюючого трансформатора? Із якою метою охолоджується трансформатор і способи охолодження?
9. Трифазні трансформатори, будова, схема з'єднання обмоток, особливості експлуатації?
10. Поясніть, що називається групою з'єднань обмоток трансформатора.
11. Спрощена схема заміщення трансформатора. Як визначаються її параметри?
12. Які спеціальні типи трансформаторів Ви знаєте та їх практичне використання?
13. Перерахуйте і поясніть умови паралельної роботи трансформаторів.
14. Як влаштовані, працюють і для чого служать автотрансформатори.
15. Поясніть, в чому полягає перевага автотрансформатора в порівнянні із звичайним трансформатором і коли його доцільно використовувати?
16. Поясніть пожежну небезпеку трансформаторів із масляним охолодженням, протипожежні заходи?

РОЗДІЛ 7. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ – ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

7.1. Загальні відомості, основні співвідношення та характеристики електричних машин

Незважаючи на те, що після створення перших електричних машин пройшло майже два століття, електромеханічне перетворення електричної енергії залишається одним із дивовижних явищ оточуючого нас світу. Спостерігаючи за роботою трифазного двигуна змінного струму, неосвіченій людині важко уявити як від трьох проводів, що підводяться до двигуна, така машина створює велику силу в десятки і тисячі кінських сил. Сьогодні немає такої галузі промислового виробництва, в тому числі і в побутовій сфері, де б не використовувалися електричні машини.

Розвиток і удосконалення електричних машин відбувалися і відбуваються паралельно з загальним розвитком електротехніки та досягненнями в галузі електромагнітних і електроізоляційних матеріалів, що використовуються в електромашинобудуванні.

Електричні машини сьогодні працюють всюди: на землі, в небі, на морі, в космосі. На штучному супутнику встановлюють більше 100 електродвигунів, повна потужність електрообладнання сучасного важкого літака досягає сотень кіловат; сучасні верстати мають декілька електродвигунів, які забезпечують виконання багатьох операцій; електротранспортні засоби – трамвай, тролейбус, потяги метро, електропотяги, різноманітні побутові прилади, накінець, сучасні велетенські електростанції з їх сучасними надпотужними турбо і гідро – генераторами, що мають потужність в одній машино-одиниці до одного мільйона кВт.

Так, наприклад, найбільший у світі гідрогенератор встановлений на Саяно-Шушенській гідроелектростанції (Росія) і має потужність 640 МВт, а турбогенератор на Костромській тепловій електростанції (також Росія) – 1200 МВт.

Силові електричні машини (потужністю від 0,6 до 100 кВт), що розглядаються в даному розділі, за призначенням поділяються на три види: генератори, двигуни і перетворювачі.

Генератори являють собою електромашинний агрегат, що перетворює механічну енергію в електричну.

В сучасній енергетиці генератор складається із нерухомого статора-станини і обертового в його середині ротора. Обмотками статора утворюється постійне магнітне поле; у витках обмоток, що розташовані на роторі, при обертанні у магнітному полі виникає змінна електрорушійна сила (ЕРС). Таким чином, електромашинний генератор перетворює

механічну енергію обертання в електричну енергію постійного або змінного струму.

Обертає ротор газова, парова або водяна турбіна, двигун внутрішнього згоряння або вітрова двигун. Електромашинний генератор, що приводиться в дію паровою або газовою турбіною, називається турбогенератором. Якщо ротор генератора обертається від двигуна внутрішнього згоряння (найчастіше дізеля), то такий генератор називають дізель-агрегатом.

Дізель-агрегати широко використовуються на потягах залізничного транспорту.

На гідроелектростанціях генератор обертає гідротурбіна, через це і називається він гідрогенератором.

До речі, на річці Дніпро збудовано шість гідроелектростанцій (ГЕС). Однією із шести гідроелектростанцій є Канівська ГЕС. Щорічно Канівська ГЕС виробляє 820 мільйонів кВт/годин електроенергії. На Канівській ГЕС встановлено 24 горизонтальних капсульних гідроагрегатів загальною потужністю 444 тис.кВт. Загалом же потужності Канівської ГЕС при повному їх використанні могли б забезпечувати потреби в електроенергії весь півострів Крим.

Сьогодні промислові підприємства і мешканці м.Черкас та багатьох сіл і міст Черкаського регіону безперебійно і надійно отримують канівський струм.

На атомних електричних станціях внутрішньоядерну енергію через теплову також перетворюють в механічну, а потім в електричну енергію.

Електродвигуни – електричні машини, в яких відбувається перетворення електричної енергії у механічну. В сучасному промисловому виробництві технічно розвинених країн електродвигуни займають провідне місце при перетворенні електричної енергії в механічну енергію обертального або зворотно-поступального руху.

Досить сказати, що в сучасному світі кількість енергії, що виробляється сумірна з енергією яку отримує Земля від Сонця. Більша частина електричної енергії після розподілу по споживачам перетворюється в механічну енергію. Це перетворення здійснюється електричними двигунами.

За родом струму електричні двигуни поділяються на двигуни постійного струму, основною перевагою яких є можливість відносно просто здійснювати в широких межах плавне регулювання швидкості, наприклад, електродвигуни для привода коліщатих пар рухомого складу на електричному транспорті (тягові електродвигуни), і двигуни змінного струму синхронні та асинхронні.

Синхронні двигуни – електричні машини великих потужностей 100 і більше кВт. Характерною ознакою цих електродвигунів є постійна

(незмінна) частота обертання незалежно від величини навантаження на валу. Синхронні двигуни великих потужностей 1000 і більше кВт використовуються в електроприводах потужних компресорів для перекачування енергоносіїв на великі відстані (тисячі км) і підтримки постійного тиску в газових та нафтових трубопроводах.

Найбільше розповсюдження в промисловості і в побуті одержали асинхронні електродвигуни, особливо асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором. Вони конструктивно виконані дуже просто, надійні в роботі, невимогливі в експлуатації, завжди готові до роботи.

На відміну від інших типів двигунів електричні двигуни можуть керуватися на відстані-дистанційно, що дає можливість значно покращити експлуатаційні характеристики робочих машин. Електродвигуни зробили можливим створити сучасні високопродуктивні машини, агрегатні верстати, автоматизовані лінії заводів-автоматів і багато іншого. Завдяки електродвигунам з'явився зручний електрифікований інструмент, різноманітні машини і прилади, які допомагають людині в побуті (швейні і пральні машини, пилососи, холодильники, електробритви і т.д.).

В теперішній час у багатьох країнах світу з'явилися електромобілі – автомобілі на яких силовим агрегатом являється електродвигун. Безсумнівно майбутній автотранспорт – електромобілі. Вони не забруднюють навколишнє середовище і більш дешеві в експлуатації.

В сучасних електроустановках раціональне споживання електричної енергії часто буває пов'язано не тільки з її перетворенням у механічну енергію, але і з необхідністю перетворення одного роду електричного струму в інший, наприклад змінного струму низької напруги в струм високої напруги, напруги низької частоти в напругу високої частоти, змінного струму – в постійний, трифазного – в двофазний і ін. Такі перетворення відбуваються за допомогою електричних машин, які називаються перетворювачами.

Особливо широке застосування в сучасній енергетиці одержали перетворювачі змінного струму одного рівня напруги в змінний струм другого рівня напруги тієї ж частоти, які називаються трансформаторами.

Сучасна техніка і взагалі промислове виробництво, а також будівельна індустрія неможливі без використання електричного дугового зварювання металів. Для електричного дугового зварювання застосовують як змінний, так і постійний струм. Дугове зварювання на змінному струмі проводиться від зварювальних трансформаторів, а на постійному струмі від зварювальних генераторів, перетворювачів або випрямлячів.

Найбільше поширеними в практичному використанні є агрегати-перетворювачі для електричного зварювання на постійному струмі:

1) ПЗО-300-2 – номінальною потужністю генератора 16 кВт, діапазоном регулювання зварювального струму – 115 – 315А, напругою холостого ходу – 90В;

2) ПЗГ-500-1 – номінальною потужністю генератора – 28 кВт, діапазоном регулювання зварювального струму – 60 – 500А, напругою холостого ходу – 40В.

Зварювальні агрегати типу ПЗ складаються із зварювального генератора і електродвигуна трифазного струму, насаджених на спільний вал і вбудованих в спільний корпус. Вони випускаються в захищеному виконанні і можуть бути стаціонарними і пересувними.

Зварювальні апарати змінного струму:

1) ТД – 306 – номінальною потужністю 17,5 кВт·А, зварювальним струмом – 100 – 300А, напругою холостого ходу – 70В;

2) ТД – 500 – номінальною потужністю 30 кВт·А, зварювальним струмом – 100 – 560А, напругою холостого ходу – 60 - 76В.

В останні роки знаходять застосування зварювальні випрямлячі з напівпровідниковими вентилями для перетворення змінного струму мережі в постійний зварювальний струм. Перевагами зварювальних випрямлячів в порівнянні з генераторними установками являються більш високий ККД, менші втрати в режимі холостого ходу, більший діапазон регулювання струму і менша вага.

По суті усі електричні машини працюють за принципом використання явища електромагнітної індукції і електромагнітної взаємодії, а тому очевидно, в будь-якій машині повинна бути система, що створює магнітне поле, так звана система збудження. (У силових електричних машинах – електромагнітна система збудження, у мікромашинах, та малопотужних система збудження від постійних магнітів).

Друга складова будь-якої електричної машини – система робочих провідників (робоча обмотка), що розташована на обертальній частині машини, в якій при лінійному переміщенні чи круговому обертанні в магнітному полі наводиться (індукується) електрорушійна сила, яка в подальшому виконує корисну роботу.

Розглянемо основні процеси в електричних машинах, скориставшись найпростішою схемою електромеханічного перетворювача (рис.7.1).

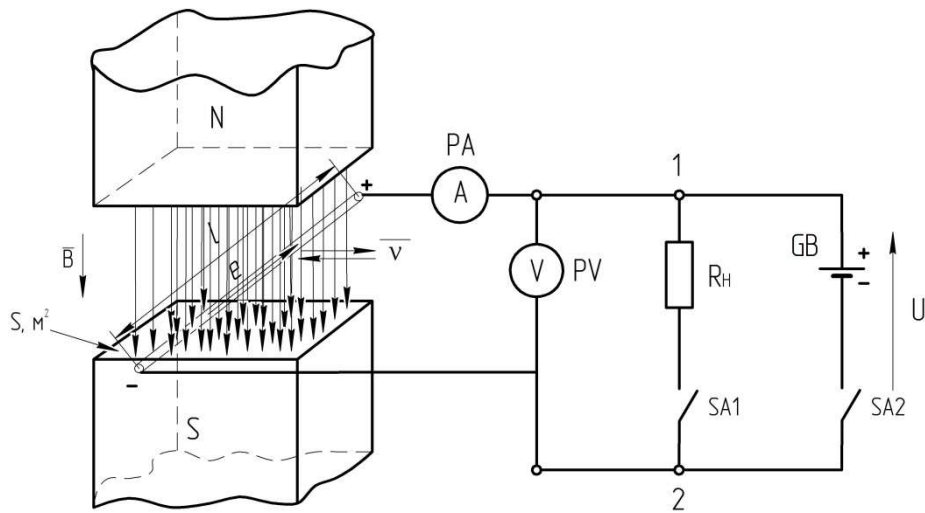


Рис. 7.1. Схема електромеханічного перетворювача

Електромеханічний перетворювач складається із системи збудження у вигляді постійних магнітів із полюсами N і S і магнітною індукцією B , провідника з активною довжиною l , що рухається у магнітному полі, а також системи проводів, що утворюють замкнене коло з навантаженням R_n , а також додаткових елементів: вимірювальних приладів PA, PV, вимикачів SA1, SA2 й акумуляторної батареї GB.

Оцінімо роботу електромеханічного перетворювача в трьох його основних режимах:

1. Робота електромеханічного перетворювача в режимі холостого ходу.

Уявімо собі спочатку, що провідник під дією зовнішньої механічної сили рухається у магнітному полі. Вимикачі SA1 і SA2 розімкнені, опір навантаження і струм у колі відсутні. Такий режим електромеханічного перетворювача називається режимом холостого ходу.

Разом з тим, за законом електромагнітної індукції при перетинанні провідником магнітних силових ліній в ньому індукується ЕРС, миттєве значення якої визначається рівнянням:

$$e = Blv,$$

де B – магнітна індукція, Тл;

l – активна довжина провідника, м;

v – швидкість взаємного переміщення, м/с.

Напрямок індукованої ЕРС визначається за правилом правої руки (див. розділ 3 п.3.2.3).

В реальних електричних машинах для одержання необхідної величини ЕРС в магнітному полі розташовується не один, а ряд послідовно з'єднаних провідників, які утворюють обмотку спеціальної конструкції, яка складається з окремих котушок (секцій), сторони яких за відповідною

схемою укладаються у пази, що виштамповані на поверхні обертальної частини машини. У машин постійного струму обертальна частина називається якорем, у змінного струму – ротором.

2. Робота електромеханічного перетворювача в режимі генератора.

Якщо провідник рухається у магнітному полі, а до затискачів 1,2 вимикачем SA1 під'єднати навантаження R_H , то у колі виникне струм який, протікаючи через опір навантаження, виконує корисну роботу, перетворюючи електричну енергію у теплову. Отже електромеханічний перетворювач, у якому первинною електричною величиною являється електрорушійна сила, а вторинною струм, працює у режимі генератора, перетворюючи механічну силу в силу електричну.

Цю силу буде визначати струм

$$i = \frac{e}{R_H + (r_a + r_{np})}, \text{ А} \quad (7.1)$$

де R_H – опір навантаження, Ом;

$r_a + r_{np}$ – сума опорів активної частини провідника, що рухається у магнітному полі і з'єднувальних проводів, Ом.

При цьому величина напруги U на навантаженні (точки 1,2) буде виміряна вольтметром V .

$$U = iR_H = e \frac{R_H}{R_H + (r_a + r_{np})} = e - i(r_a + r_{np}). \quad (7.2)$$

Із рівняння (7.2) виходить, що при збільшенні струму у колі (за зменшенням R_H) напруга на затискачах 1,2 зменшується в межах: $U = e$ при холостому ході коли $i=0$ до $U=0$ при короткому замиканні коли $R_H = 0$.

Одночасно в провіднику зі струмом, що рухається у магнітному полі, внаслідок взаємодії магнітного поля і магнітного поля провідника зі струмом виникає електромагнітна сила взаємодії F_{em} . Величина сили, що діє на провідник з струмом, вміщеного у магнітне поле пропорційна активній довжині провідника l , струмові i у провіднику та магнітній індукції B :

$$F_{em} = Bli. \quad (7.3)$$

Для визначення напрямку сили, що діє на вміщений у магнітне поле провідник зі струмом, застосовується правило лівої руки (див. розділ 3 п.3.2.4).

Для забезпечення генераторного режиму, тобто рівномірного руху провідника у магнітному полі необхідна первинна механічна сила F_1 , яка б змогла перебороти електромагнітну силу F_{em} і сили тертя, що виникають внаслідок руху $F_{тер.}$, тобто

$$F_1 = F_{em} + F_{мер}. \quad (7.4)$$

Рівняння рівноваги сил (7.4) може бути перетвореним у рівняння рівноваги потужностей. Для цього досить помножити обидві частини рівняння (7.4) на швидкість v , одержимо

$$P_1 = P_{em} + p_0, \quad (7.5)$$

де $P_1 = F_1 v$ – потужність первинного двигуна (дизель і інші), що обертає обертальну частину генератора - якір;

$P_{em} = F_{em} v = Bliv = ei$ – електромагнітна потужність генератора;

$p_0 = F_{мер} v$ – потужність втрат холостого ходу (при відсутності навантаження).

Корисна потужність в генераторному режимі виділяється на опорі навантаження і дорівнює

$$P_2 = ui = ei - i^2(r_a + r_{np}) = P_{em} - p_{np}. \quad (7.6)$$

Із рівняння (7.6) можна зробити висновок, що частина виробленої електромагнітної потужності втрачається на внутрішньому опорі самого генератора (провідника) і з'єднувальних проводах.

Коефіцієнт корисної дії генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = \frac{ui}{ui + \sum p}, \quad (7.7)$$

де $\sum p = p_0 + p_{np}$ – сумарні втрати потужності при перетворенні електричної енергії.

3. Робота електромеханічного перетворювача в режимі двигуна.

Для здійснення режиму двигуна необхідно на затискачі 1,2 (рис. 7.1) подати напругу від зовнішнього джерела живлення – акумуляторної батареї GB, шляхом вмикання вимикача SA2.

Робота будь-якої електричної машини в режимі двигуна базується на використанні принципу взаємодії провідника зі струмом з магнітним полем.

Під впливом ЕРС зовнішнього джерела живлення у колі перетворювача установиться струм. Напрямок струму в активному провіднику зміниться на протилежний по відношенню до генераторного режиму. Взаємодія провідника зі струмом і магнітного поля (електромагнітна взаємодія) утворює електромагнітну силу F_{em} , що має напрям в бік руху провідника. При цьому в провіднику наводиться ЕРС за тим же напрямом, що і в попередньому режимі і яка діє (за законом Ленца) проти збурюючого первинного впливу, в даному випадку проти напруги зовнішнього джерела живлення (акумуляторної батареї). Із цього явища випливає висновок: електромеханічний перетворювач (в подальшому – електрична машина), що працює в режимі електричного двигуна, утворює протидіючу ЕРС (напроти ЕРС) і має напрям дії – проти струму, що є

наслідком споживання електричної енергії, яка перетворюється в механічну.

В такій електричній машині струм являється первинним, ЕРС вторинною.

Рівняння, що характеризують режим двигуна, можуть бути подані в наступному вигляді.

Рівняння електричної рівноваги

$$U = e + i(r_a + r_{np}). \quad (7.8)$$

Рівняння механічної рівноваги

$$F_{em} = Bli = F_H + F_{тер.}, \quad (7.9)$$

тобто сила електромагнітної взаємодії при рівномірному русі втрачається на перемагання внутрішніх сил тертя $F_{тер.}$ і сил навантаження F_H .

З переходом до рівнянь потужностей маємо:

$$Ui = P_1 = ei + i^2(r_a + r_{np}) = P_{em} \cdot p_{np} \quad (7.10)$$

$$F_{em} v = P_2 = P_{em} \cdot p_0, \quad (7.11)$$

де $P_2 = F_H v$ – корисна механічна потужність, що розвиває електромеханічний перетворювач в режимі двигуна.

В реальній електричній машині, що працює в режимі двигуна, P_2 – це потужність на валу двигуна яку він розвиває і передає робочому механізму при перетворенні електричної енергії в механічну енергію.

Механічна характеристика двигуна зображає при лінійному русі залежність швидкості від сили $v(F)$, а при обертальному – залежність частоти (швидкості) обертання від обертального моменту $\omega(M)$ або $n(M)$.

Механічна характеристика двигуна являється найбільш важливою робочою характеристикою.

Для електромеханічного перетворювача з лінійним рухом провідника із рівнянь, що розглядалися вище, виходить, що швидкість руху,

$$v = \frac{U - i(r_a + r_{np})}{Bl} = \frac{U}{Bl} - \frac{r_a + r_{np}}{(Bl)^2} F_{em}, \quad (7.12)$$

тобто із зростанням навантаження швидкість руху зменшується.

Коефіцієнт корисної дії перетворювача в режимі двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = \frac{Ui - \sum p}{Ui}. \quad (7.13)$$

Такі принципові співвідношення в будь-якій, електричній машині.

В електричній машині взаємне перетворення механічної і електричної енергії може відбуватися в будь-якому напрямку, тобто одна і та ж машина може працювати як двигуном, так і генератором. Це буде залежати

від того, яка енергія до машини підводиться і яка знімається. Цей принцип називається принципом оборотності електричних машин, він був встановлений Е.Х.Ленцем в 1883 році. Він може бути застосований до будь-якої електричної машини. Проте кожна машина, що випускається заводом-виробником проектується і призначається для одного, певного режиму роботи (двигуном чи генератором). В такому разі виявляється можливим найкращим чином пристосувати машини для заданих виробничих умов роботи.

7.2. Класифікація електричних машин

Сучасні електричні машини відрізняються за багатьма ознаками в залежності від виду струму, конструктивних особливостей, виконання, способу охолодження та іншим. За видом струму розрізняють електричні машини постійного і змінного струму. За потужністю електричні машини умовно поділяють на мікромашини – до 0,6 *кВт*, машини малої потужності – до 10 *кВт*, середньої – до 100 *кВт* і великої потужності – більше 100 *кВт*. В теперішній час гранична потужність машини в одиниці досягає 1200 тис. *кВт*. Електричні мікромашини і машини малої потужності змінного струму випускаються для роботи на промисловій частоті 50 Гц і високій частоті 400 і 1000 Гц. Наприклад, в літакобудуванні.

Суттєвий вплив на конструкцію машини чинить робоча частота обертання. Розрізняють тихохідні машини з частотою обертання до 500 об/хв, машини із середньою частотою обертання – до 1500 об/хв, швидкохідні – до 3000 об/хв і понад швидкохідні, частота обертання яких досягає 150000 об/хв.

Крім того, машини відрізняються за величиною робочої напруги, яка може змінюватися в межах від частки вольт до десятків тисяч вольт.

Електричні машини постійного струму в залежності від способу збудження в свою чергу діляться на машини з незалежним збудженням, з паралельним збудженням (шунтові), з послідовним збудженням (серієсні) і з мішаним збудженням (компаундні).

Електричні машини змінного струму за кількістю обмоток та схемою їх з'єднання виготовляються на живлення від однофазних і трифазних електричних мереж. В залежності від цього машини виконуються трифазними або однофазними.

Найбільше розповсюдження в промисловому виробництві на теперішній час одержали електродвигуни в трифазному виконанні. До числа електродвигунів змінного струму відносяться асинхронні, синхронні і колекторні електродвигуни різного виконання і призначення.

Широке впровадження електричного привода у всі галузі народного господарства в сучасних умовах породило багаточисельну різноманітність електродвигунів.

На підприємствах електродвигунам приходится працювати в різних умовах. У зв'язку з цим електричні машини класифікуються за способом захисту від навколишнього середовища. Електричні машини виготовляються у відкритому, захищеному, закритому і в захищеному проти вибуху виконанні.

Відкриті електричні машини не мають спеціальних захисних пристроїв. Ці машини призначені для установки в сухих, чистих приміщеннях при відсутності пилу та інших будь-яких домішок в повітрі і забезпеченні умов роботи, при яких виключається можливість попадання в порожнину двигуна будь-яких побічних предметів. У всіх інших випадках щоб уникнути зменшення строку служби або виходу із ладу внаслідок механічних пошкоджень і псування ізоляції обмоток, машини повинні бути захищені від середовища, в якому вони повинні працювати.

Відкрита незахищена електрична машина в силу простоти своєї конструкції при інших рівних умовах виявляється завжди дешевше захищених машин. При цьому умови охолодження відкритих машин, внаслідок кращих умов тепловіддачі, виявляються більш сприятливими. Через це у всіх випадках, коли це припустимо за умовами експлуатації, бажано використовувати відкриті електричні машини.

В захищених електричних машинах обмотки та інші їх частини, що знаходяться під напругою або в русі, захищені від доторкання або проникнення всередину сторонніх предметів при збереженні вільного обміну охолоджуючого повітря між машиною і навколишнім середовищем.

Електричні машини подібної конструкції відносяться до розряду машин, захищених від дощу і бризок води. Такі машини більш складні в конструктивному відношенні.

Для використання в вибухонебезпечному або пожежонебезпечному середовищі виготовляють спеціальні електричні машини з повним закриттям в противибухову оболонку з підсилюванням ущільнення фланців. Подібні електричні машини, обладнані спеціальним кожухом і мають конструкцію, що перешкоджає передачі полум'я, спалахнувшого всередині машини газу, в навколишнє середовище і при цьому забезпечує збереження машини. Такі електричні машини називаються вибухозахищеними.

Необхідно відмітити, що умови охолодження для закритих і вибухозахищених електричних машин надзвичайно погіршуються, що удорожчує машину і погіршує використання закладених в неї активних електричних матеріалів. Умови охолодження електричних машин в значній мірі залежать від прийнятої для них систем охолодження. У відповідність з прийнятими нормами розрізняють електричні машини з природним охолодженням, з самовентиляцією і з примусовим охолодженням.

Машини з природним охолодженням не мають ніяких спеціальних пристосувань для охолодження.

Охолодження машини з самовентиляцією забезпечує вентилятор зовнішнього обдуву, що розташований на обертальній її частині (на валу якоря або ротора) і захищений кожухом вентилятора. Для утворення інтенсивного охолодження (значних габаритів машин) використовують примусове охолодження за допомогою спеціального охолоджуючого середовища (газоподібного або рідинного), що подається вентилятором або насосом, працюючим незалежно від машини.

Основні принципи виконання електричних машин з точки зору захисту від навколишнього середовища при роботі на підприємстві визначаються умовами, в яких приходиться їм працювати.

Специфічною особливістю ряду виробництв є те, що продукти виробництва в багатьох випадках як у чистому вигляді, так і в суміші з іншими продуктами і газами вибухо- і пожежонебезпечні. Вибухонебезпечними речовинами, як відомо, є багато хімічних продуктів та їх суміші. В ході хімічних процесів можуть виникнути такі умови, при яких концентрація хімічних речовин в навколишньому середовищі виявляється небезпечною у вибухопожежному відношенні. В якості приводу виробничих агрегатів на підприємствах хімічної промисловості використовуються електродвигуни, до яких пред'являються особливі вимоги у відношенні вибухонебезпеки. Можливими причинами виникнення вибухів хімічних продуктів і їх сумішей при роботі електрообладнання є електричні дуги та іскри, а також високі температури елементів електрообладнання. З метою попередження небезпеки вибуху в ряді випадків доцільно електрообладнання, що використовується, особливо з частинами, що іскрять в процесі нормальної роботи, виносити за межі потенційно небезпечних приміщень в сусідні, призначені для цієї мети, приміщення. Електричні живильні мережі в цьому випадку також прокладаються зовні вибухонебезпечних приміщень.

На практиці більш просто, а отже, раціонально використовувати спеціальне вибухозахищене електроустаткування, яке дозволяє розташовувати і експлуатувати його безпосередньо у вибухонебезпечному середовищі. При цьому для боротьби з небезпекою вибуху дуже ефективно застосування постійно діючої потужної високонадійної системи вентиляції.

В залежності від роду струму електричної установки електричні машини (генератори, двигуни, перетворювачі) можуть бути розраховані та виконані для роботи на змінному або постійному струмі. У відповідності з цим вони поділяються на машини постійного і машини змінного струмів.

7.3. Електричні машини постійного струму

7.3.1. Призначення і області використання машин постійного струму

Треба віддати належне машині постійного струму, яка була першою, що здійснила на практиці перетворення електричної енергії у механічну роботу (двигун Якобі 1838 р.). Знадобилось більше 50 років наполегливої праці багатьох вчених, поки був впроваджений у виробництво більш надійний і удосконалений двигун трифазного змінного струму (асинхронний двигун Доливо-Добровольського 1891 р.).

З тих часів розвиток, удосконалення і використання машин постійного і змінного струмів йдуть поряд, і сьогодні, коли ввійшли в практику напівпровідникові силові прилади діоди і тиристри, використання яких дають можливість управляти швидкістю обертання двигунами змінного струму, важко віддати перевагу тому чи іншому виду електричних машин в електромеханічних перетворювачах.

У сучасній електромеханіці й енергетиці знайшли найбільш практичне використання електроустановки і електрообладнання з використанням змінного струму. Незважаючи на його перевагу родопочатківець електротехніки, постійний струм, і на його основі машини постійного струму і на сьогодні не втратили своєї значимості. Двигуни постійного струму знаходять використання у всіх тих випадках коли їх особливі властивості мають вирішальне значення. Вони володіють широким діапазоном і плавністю регулювання частоти обертання, зберігаючи на всьому діапазоні регулюванні високий ККД і можуть мати електромеханічні характеристики, що відповідають спеціальним вимогам виробничих машин і механізмів.

За допомогою потужних двигунів постійного струму приводяться в дію гребні гвинти на океанських лайнерах, криголамах, підводних човнах, а в металургійній промисловості – слябінги і блюмінги при горячій прокатці металевих конструктивних матеріалів.

Малопотужні електричні машини постійного струму в діапазоні потужностей від часток вата до декількох сот ват, одержали широке і різноманітне використання у всіх сферах людської діяльності від побутової техніки, автоматики, телемеханіки, обчислювальної техніки до великих космічних кораблів і ракет.

7.3.2. Призначення та практичне використання

Як уже відмічалось, ті електричні машини, в яких здійснюється перетворення механічної енергії в електричну, називаються електричними генераторами, а машини, в яких проводиться зворотне перетворення, називаються електричними двигунами.

Таким чином, генератори слугують джерелом електричної енергії, двигуни – механічної.

Генератори постійного струму класифікуються за способом живлення, обмотки збудження, так як властивості генераторів в основному обумовлені способом збудження. В залежності від способу збудження розрізняють генератори з незалежним збудженням і самозбудженням. У генератора з незалежним збудженням обмотка збудження одержує живлення від стороннього джерела постійного струму. У генераторах із самозбудженням обмотки збудження одержують живлення від самих же генераторів.

Генератори постійного струму (ГПС) використовують на практиці у таких галузях промисловості, де за умов виробництва потрібний або є переважним постійний струм (металургійні і електролізні підприємства, транспорт і інші), він отримується найчастіше шляхом перетворення змінного струму в постійний за допомогою перетворювачів напівпровідникового або машинного типу. В останньому випадку широко застосовують установки за схемою двигун-генератор, в яких двигун змінного струму або дизельний двигун зчленується з генератором постійного струму на одному валу.

Як первинні джерела енергії генератори постійного струму вживаються, головним чином, в поодиноких ізольованих установках – для живлення обмоток збудження синхронних машин (як генераторів так і двигунів), зарядження акумуляторних батарей, на автомобілях, літаках, при дуговому зварюванні металів, для освітлення поїздів, на морських суднах, на підводних човнах і т.д.

В машинобудівельній, підшипниковій, хімічній промисловості, на підприємствах побутової техніки використовуються генератори постійного струму з низькою напругою і великими струмами. До числа цих генераторів відносяться:

1) генератори для живлення електролізних установок на потужності 160-550 кВт, 75-80 В, 2140-6500 А;

2) зварювальні генератори при робочій напрузі 25-50 В і різних значеннях зварювального струму;

3) генератори для гальванопластики і гальванічного покриття на потужності 3-30 кВт, 6-12 В, 250-5000 А. Такі генератори застосовуються для гальванічного покриття металевою плівкою товщиною від частки Мкм до десятих часток мм, яку наносять в електричних гальванічних ваннах заповнених соляним розчином цих металів. При проходженні постійного струму через метал відбувається процес електролітичного осадження металу на поверхню металевого виробу. Позитивно заряджені іони металів взаємодіють з електронами і розряджаються на поверхню металів, що покриваються. Ця технологія дає можливість захисту оброблених виробів

від корозії, механічного зносу, відновлення розмірів пошкоджених деталей, а також придання поверхні спеціальних фізичних і хімічних властивостей. Найбільше розповсюдження на практиці одержали гальванічні покриття нікелювання і хромування.

На промислових підприємствах з потужними електромеханічними агрегатами, де за технологічним процесом потрібні потужні початкові і гальмівні моменти (зусилля) з одночасним плавним, в широких межах, регулювання швидкості, використовують тримашинні електричні системи генератор-двигун (Г-Д). Система Г-Д складається із робочого двигуна постійного струму з незалежним збудженням до затискачів рухомої частини двигуна-якорю підводиться напруга від окремого генератора, який не має інших споживачів, крім двигуна, що розглядається. Генератор в свою чергу може приводитися в дію механічним або електричним двигуном будь-якого типу.

Найбільш характерні технічні області використання системи Г-Д – це електроприводи в шахтних піднімальних машинах потужністю в сотні і тисячі кВт, реверсивних прокатних станах потужністю до 10000 кВт з моментом на валу двигуна до 300 тм, станах холодної прокатки металу, потужних турбоповітрянодувках; спеціальних металорізальних верстатах, автоматизованих електроприводах різного призначення, тепловозах і електровозах електричних трансмісій для заміни механічних передач (див. також розділ 7).

Двигуни постійного струму у сфері виробництва і в багатьох галузях народного господарства не менше, а навіть більш доцільні ніж генератори.

Якщо перейти від елементарного електромеханічного перетворювача до реальної електричної машини постійного струму, то при роботі машини в генераторному режимі, виходячи із рівняння (5.2), ЕДС якоря E буде більше, ніж напруга на його затискачах, на величину спаду напруги у колі якоря ($IR_{\text{я}}$):

$$E = U + IR_{\text{я}},$$

де $R_{\text{я}}$ – повний опір кола якоря.

У такому випадку струм протікає від позитивного затискача генератора у зовнішню мережу і електромагнітний момент машини є гальмівним.

$$M_{\text{ем}} = P_{\text{ем}} / \omega.$$

Машина постійного струму, що підключена до мережі постійного струму має можливість працювати як у генераторному, так і в режимі двигуна. Якщо у генератора з паралельним або незалежним збудженням, що підключений до цієї мережі, зменшити струм збудження з таким розрахунком, щоб ЕРС якоря E стала меншою за величину напруги мережі, то струм у колі якоря через перевагу величини напруги мережі над

величиною ЕРС змінить напрямок, тобто буде проходити від мережі до машини. При цьому електромагнітний момент також поміняє напрям у бік обертання машини, тобто стане обертальним (режим двигуна).

Таким чином, машина постійного струму може бути переведена із генераторного режиму в режим двигуна, при якому якір машини почне споживати із мережі струм, що утворюється різницею напруги мережі й ЕРС якоря:

$$I = (U - E)/R_{я}.$$

Позитивні якості двигунів постійного струму (ДПС) – великий діапазон регулювання частоти обертання, швидкодія, плавність і точність відпрацювання заданих команд від відносно простих схем керування, привели до переважного їх застосування в сучасних автоматизованих системах електроприводів. Незважаючи на те що ДПС в 2-3 рази дорожче, ніж двигуни змінного струму, вони знаходять належне місце в широкому діапазоні потужностей електромеханічних перетворювачів.

Істотним недоліком машин постійного струму (МПС) є наявність електричного ковзного щіткового колекторного вузла, який у процесі роботи може створювати дуги й іскри, потребує постійного додаткового догляду, частого ремонту, ускладнює забезпечення пожежо та вибухозахисту, крім того, за рахунок ковзання щіток по колектору МПС є джерелом теле- і радіоперешкод.

Відносно двигунів постійного струму необхідно зауважити, що вони здатні працювати тільки від мережі постійного струму, в той час, як промислові мережі живляться змінним струмом, тому потрібні додаткові перетворювачі змінного струму в постійний, що в значній мірі ускладнює використання двигунів постійного струму. А тому, використання ДПС, в тому чи іншому випадку, потребує техніко-економічного обґрунтування по відношенню до двигунів змінного струму аналогічного призначення з урахуванням вартості схеми керування двигуном.

7.3.3. Створення та практичне удосконалення машин постійного струму

Історія створення та розвитку електричної машини тісно пов'язана з основними етапами в історії електротехніки.

Первісно створення електричних генераторів і електричних двигунів постійного струму проходило різними шляхами.

Принципово можливість створення електродвигуна була показана 190 років назад (у 1821 році) Майклом Фарадеєм. Ним був продемонстрований фізичний прилад в якому виникало обертання провідника з постійним струмом навколо магніту.

Цікаво відмітити, що в перших демонстраційних зразках електричних машин були використані уніполярні конструкції, тобто в робочій зоні існувало магнітне поле однієї полярності.

В наступних роках з'явився ряд приладів для демонстрації перетворення електричної енергії в механічну. В книжці англійського фізика і математика Пітера Барлогу «Дослідження магнітних притягнень», в 1824 році, і відомого під назвою «Колесо Барлогу» описується, наприклад, прилад в якому двоє мідних коліщат, насаджених на одній осі, розташовувалися між полюсами постійного магніту і доторкалися із ртутними ванночками. При проходженні струму колесо оберталося.

Подібну конструкцію мав і перший електромашинний генератор, названий диском Фарадея.

Перший винахідник прообразу сучасного електродвигуна залишається до сих пір невідомою людиною. В червні 1832 року Фарадей одержав листа, підписаного ініціалами «Р.М.», в якому викладалась суть новітнього винаходу – магнітоелектричної машини. Оце все, що нам відомо про її винахідника.

Одним із перших досконалих електродвигунів з електромагнітним збудженням, що найшов практичне використання, був побудований електротехніком Б.С. Якобі в 1834 році. Двигун мав торцеве виконання і складався з двох розташованих один проти одного груп П-подібних електромагнітів, із яких одна група (чотири П-подібних магніти) була закріплена на нерухомій рамі, а друга, аналогічна – на диску, що обертався. Обмотки всіх електромагнітів були з'єднані послідовно (згідно сучасній термінології двигун мав послідовне збудження). Джерелом живлення двигуна була батарея гальванічних елементів. У 1838 р. Б.С.Якобі побудував більш досконалий і потужний електродвигун, який приводив в рух невеликий катер із десятьма пасажирами на борту і рухався він зі швидкістю 4,5 км/год.

Основний недолік двигуна Якобі був пов'язаний з використанням явнополюсного виконання як для якоря (рухома частина), так і для індуктора (нерухома частина). Через цього обертальний момент двигуна був пульсуючим.

Електродвигун, обладнаний неявнополюсним якорем з розподіленою обмоткою, в якому обертальний момент практично постійний, був сконструйований італійським вченим Антоніо Пачіотті в 1860 р.

Двигун Пачіотті, так же як і двигун Якобі, не одержали розповсюдження, так як і раніше був відсутній економічний генератор електричної енергії, а живити двигун від батареї було занадто дорого і не вигідно.

Розвиток генераторів постійного струму на всіх етапах відставав від розвитку електродвигуна. Ідея уніполярного (безколекторного) генератора постійного струму, виконаного у вигляді обертового в магнітному полі диска, виникла у Фарадея в 1831 р., на 10 років пізніше здійснення ним моделі уніполярного двигуна.

Перша модель зміннополюсного генератора постійного струму, в якій було використано комутуючий пристрій для випрямлення, була побудована французькими винахідниками братами Піксі. В ній комутатор був прилаштований для випрямлення змінного струму, індукованого в нерухомих котушках, що були змонтовані на П-подібному сталюму магнітопроводі.

На практиці магнітоелектричний генератор аналогічної конструкції був використаний вперше в 1842 р. Б.С. Якобі. У ньому на відміну від генератора братів Піксі магніти були нерухомими, а котушки – обертальними.

В період 1856 по 1865 р. французькою фірмою «Альянс» випускались магнітоелектричні генератори такої конструкції з приводом від парової машини потужністю 6-10 кінських сил.

Проте початком промислового використання генераторів постійного струму було покладено бельгійським винахідником і співробітником фірми «Альянс» Зенобом Теофілом Граммом (див. стор. 226), який одержав в 1870 році патент на генератор з самозбудженням з кільцевим якорем подібним сучасній конструкції. Завдяки своїм очевидним перевагам (можливість одержання практично постійної напруги, відсутність додаткового джерела струму для збудження, порівняльно невеликій масі і високому ККД) генератор Грамма швидко витіснив інші типи і одержав дуже широке розповсюдження. Оскільки до цього часу принцип оборотності був уже добре відомим, машина Грамма стала використовуватися в режимі як генератора, так і двигуна. Таким чином, з цього часу обидві лінії розвитку електричних машин постійного струму, генераторів і двигунів, об'єдналися.

7.3.4. Принцип дії, режими роботи та будова машини постійного струму

Режим генератора. Рамку ABCD (рис. 7.2) обертає з постійною частотою ω первинний двигун ПД (дизель, турбіна та інші). Провода АВ і CD (довжиною l) перетинають лінії індукції магнітного поля B зі швидкістю V .

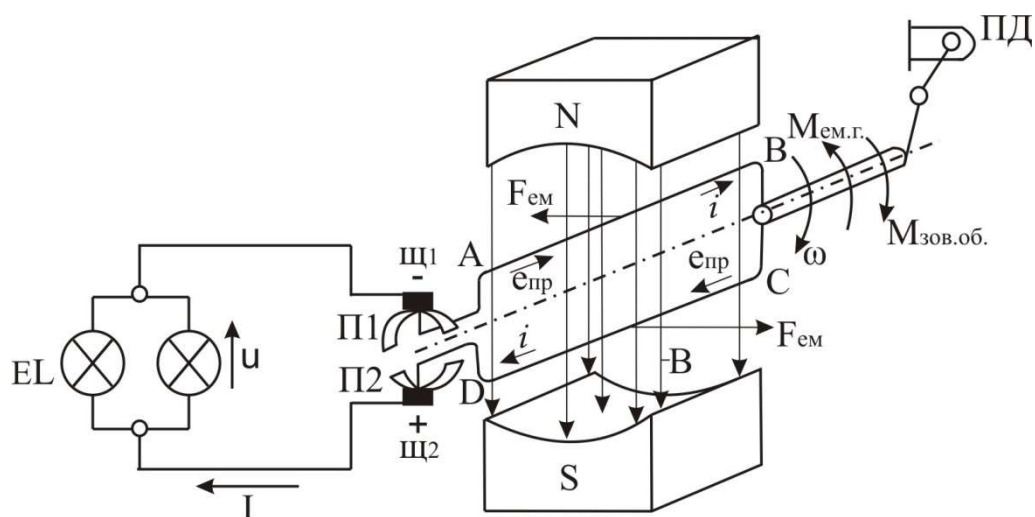


Рис. 7.2. Схема елементарного генератора постійного струму

В рамці індукується $E_{пр} E_p = 2e_{пр} = 2Blv$, напрямок якої визначається правилом правої руки (індуктивна дія магнітного поля). Разом з рамкою обертаються колекторні пластини П1 і П2, до яких приєднуються її виводи. По пластинам ковзають нерухомі щітки щ1 і щ2. Якщо замкнути коло приймача (лампи EL), з'явиться струм I, що співпадає з напрямком $E_{пр} E_p$. Через півоберта провід AB і пластина П1 будуть знизу, а провід CD і пластина П2 – зверху. Напрямок EPC і струму під полюсами і струму в зовнішньому колі збереглися, а в рамці EPC і струм мають напрямок від D до A: EPC і струм у рамці – змінні, а напруга і струм у зовнішньому колі – постійні, оскільки до щітки щ2 завжди доторкається та колекторна пластина, на якій позитивна полярність, а до щітки щ1 – негативна. Колектор генератора – механічний випрямляч.

На провідник зі струмом у магнітному полі діє механічна, так звана електромагнітна сила $F_{ем}$ (механічна дія магнітного поля). Напрямок її визначається правилом лівої руки. Для генератора ці сили мають напрямок проти руху рамки. Вони утворюють гальмівний електромагнітний момент $M_{ем.г.} = 2F_{ем} R_2$, прикладений до вала рамки (R_2 – відстань провідів від осі). Для підтримання обертання ПД прикладає до вала зовнішній обертальний момент $M_{зов.об.}$. Від ПД підводиться механічна потужність $P_{мех} = M_{зов.об.} \omega$, яка перетворюється генератором в електричну потужність $P_{ем} = EI$ і називається електромагнітною потужністю.

При відсутності втрат $P_{ем} = P_{мех}$. В генераторі EPC первинна, струм вторинний.

Режим двигуна. Ту ж нерухому рамку (рис. 7.3) підмикаємо до джерела постійного струму з напругою U (акумулятору GB). Виникне струм I, що має напрямок у рамці від D до A, і електромагнітні сили $F_{ем}$

створюють обертальний електромагнітний момент M_{em} під дією якого рамка починає обертатися з кутовою швидкістю ω . Через півоберта рамки провід AB і пластина $\Pi 1$ будуть займати нижнє положення, а провід DC і пластина $\Pi 2$ будуть зверху. Напрямок струму під полюсами, електромагнітних сил і момент не змінився, хоча напрямок струму в рамці змінився (від A до D). Постійний струм джерела перетворюється в змінний струм у рамці: колектор двигуна – механічний інвертор (пристрій для перетворення постійного струму в змінний). Вал двигуна під дією моменту M_{em} обертає робочу машину PM , перемагаючи її момент опору M_{on} (навантаження).

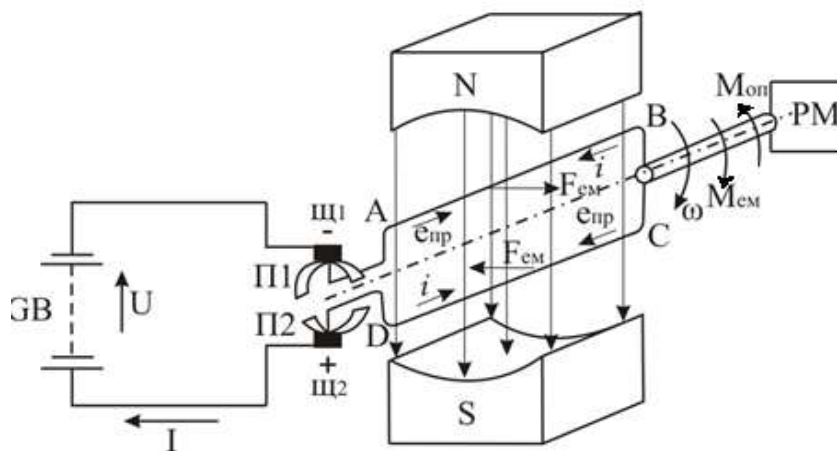


Рис. 7.3. Схема елементарного двигуна постійного струму

При обертанні в рамці наводиться EPC $E_p = 2e_{пр}$. В режимі двигуна EPC має напрямок проти струму I , тому її називають протидіючою- EPC (споживання електроенергії). Двигун утворює момент (силу), що обертає механізм (робочу машину). В двигуні струм первинний, EPC вторинна.

Будова машини постійного струму (МПС). В теперішній час промисловістю виготовляються найрізноманітніші МПС, тому окремі вузли цих машин можуть мати різну конструкцію, але загальна конструктивна схема генераторів і двигунів однакова.

Сучасна конструкція машини постійного струму приведена на рис. 7.4. Основними її елементами є магнітна система і робоча обмотка. Нерухома частина машини – станина називається статором, оберտальна частина – якорем.

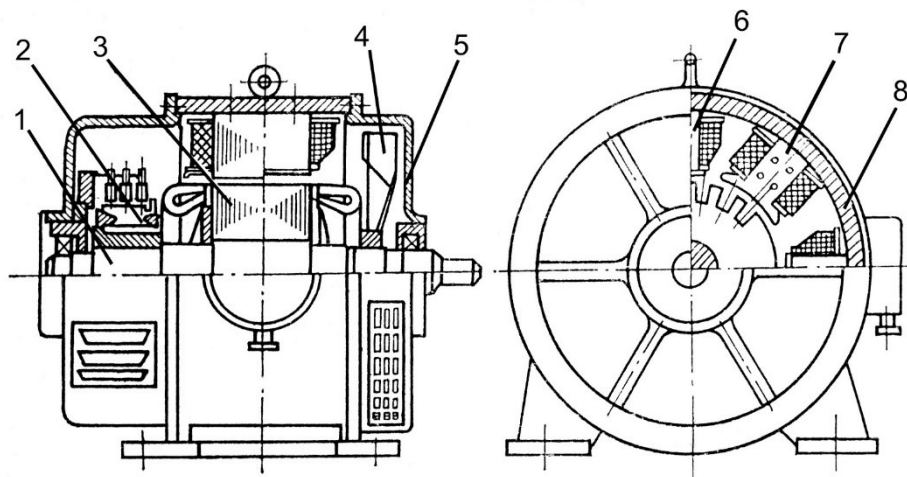


Рис. 7.4. Машина постійного струму
1 – вал; 2 – колектор; 3 – якір; 4 – вентилятор; 5 – підшипниковий щит; 6 – додатковий полюс; 7 – головний полюс; 8 – станина

Магнітна система МПС приведена на рис. 7.5.

Зовнішня ділянка магнітного кола 1, яка замикає магнітні полюси, називається ярмом (вона ж є і станиною). Воно повинно мати достатню міцність, і зазвичай виконується із конструкційної сталі досить великого перерізу. По ярму проходить постійний магнітний потік, магнітна індукція в ньому невелика через великий переріз. В нижній частині станини є лапи 6 для кріплення машини до фундаментної плити чи конструкції робочого механізму.

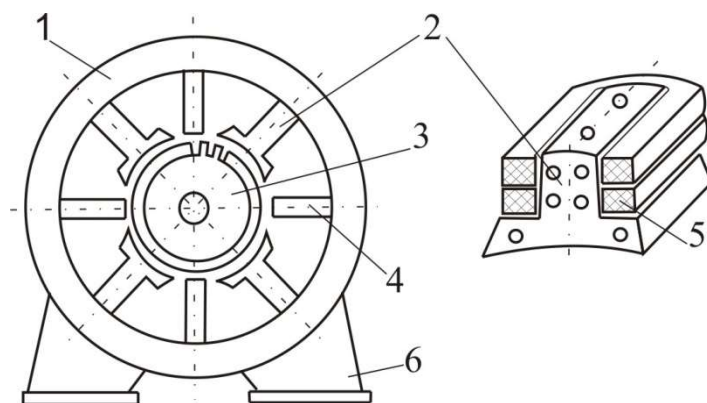


Рис. 7.5. Магнітна система машини постійного струму
1 – ярмо (станина); 2 – осердя головного полюса;
3 – осердя якоря; 4 – осердя додаткових полюсів;
5 – обмотка збудження; 6 – лапа кріплення

До ярма кріпляться осердя полюсів. Для збудження електричних машин зазвичай використовують електромагніти (постійні магніти

застосовують в основному в мікромашинах). Осердя 2 головних полюсів виконують із листової електротехнічної сталі (листки товщиною 0,35...0,5 мм) з підвищеною магнітною проникністю. На осерді розташована обмотка 5 електромагніта (обмотка збудження), що утворює магнітний потік. На обертальній частині (якорі) знаходиться робоча обмотка. Особливістю якоря порівняно з іншими ділянками магнітного кола є те, що він обертається у магнітному полі, тобто матеріал якоря зазнає перемагнічування. Для зменшення втрат у тілі якоря, що викликаються перемагнічуванням, його осердя набирають із окремих ізольованих листів електротехнічної сталі, що має не тільки високу магнітну проникність, але і знижені втрати при перемагнічуванні.

Повітряний проміжок між станиною і якорем невеликий по величині 0,2-1,2 мм, проте чинить істотний вплив на магнітні і робочі характеристики електричної машини. Магнітна проникність повітря в десятки тисяч раз менше магнітної проникності сталі, із якої виконані решта ділянок магнітного кола. Через це величина повітряного проміжку визначає потужність систем збудження.

Окрім основних полюсів, в машинах постійного струму використовуються додаткові полюси 4, що розташовані між основними полюсами на станині машини. Обмотка додаткових полюсів вмикається послідовно з обмоткою якоря машини. Призначення обмотки додаткових полюсів – усувати іскріння на колекторі, тобто вона покращує роботу щіткового (ковзного) контакту і практично не впливає на робочі характеристики машини.

На циліндричні поверхні осердя якоря виштампувані пази, в які укладається робоча обмотка. Вона складається з окремих котушок (секцій), сторони яких укладені у відповідні пази. Секції з'єднуються за певною схемою. При закладанні секцій в пази їх ізолюють від стінок паза спеціальною ізоляцією із електрокартона.

Як уже відмічалось вище, в провідниках робочої обмотки МПС, при обертанні під полюсами з чергуючою полярністю, наводяться змінні ЕРС і протікає змінний струм. В той же час у зовнішньому колі напруга і струм постійні. Роль такого перетворювача виконує колектор і ковзаючі по ньому струмознімальні контакти (щітки).

Колектор є одним із складних вузлів МПС. Основними елементами колектора є мідні пластини. Самі колекторні пластини являють собою ізольовані мідні сегменти, скріплені металевою конструкцією або пластмасою. Кінці секцій, що закладені в пази, під'єднуються до колекторних пластин у певному порядку, що забезпечує утворення необхідної схеми обмотки. Струмознімання з колектора виконується вугільно-графітовими ковзними контактами (щітками), які притискуються до колектора. Ступінь натиснення щіток на колектор регулюється

пружинами щіткотримача. Останні укріплюються на траверсі, поворотом якої на деякий кут змінюється положення щіток на колекторі.

Осердя якоря разом із обмоткою і колектором закріплені на валу, що обертається в підшипниках. Підшипники зазвичай вбудовані у бокові кришки (щити).

7.3.5. Генератори постійного струму. Параметри та характеристики для практичного використання

Генератор постійного струму (ГПС) – електрична машина для перетворення механічної енергії в електричну. Взагалі, теоретично МПС – це оборотний електромеханічний перетворювач енергії який може бути використаним як в генераторному, так і в двигунному режимах. На практиці у виробництві потрібно використовувати ці машини тільки за призначенням, згідно паспорту на виріб. Якщо основні частини генератора і двигуна зовнішній вигляд мають однаковий, то розрахунки і будова їх магнітних систем відрізняються, а тому вони мають різні електромеханічні характеристики.

На рис.7.6 показані основні частини генератора постійного струму, а на рис.7.7. схема обмотки якоря.

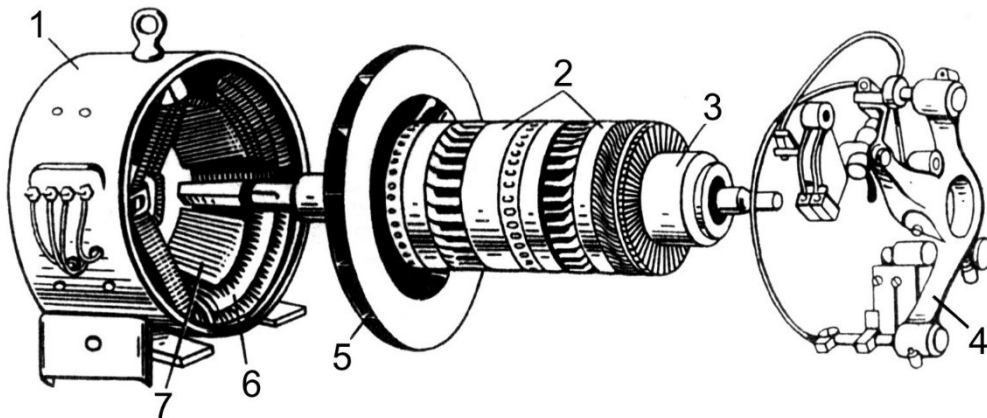


Рис. 7.6. Основні частини генератора постійного струму
1 – станина; 2 – якір; 3 – колектор; 4 – траверса з щіткотримачами;
5 – вентилятор; 6 – обмотка збудження; 7 – осердя полюса

ЕРС якоря. Відомо, що принцип дії генератора постійного струму оснований на законі електромагнітної індукції (див. п.7.3.3.). При обертанні якоря яким-небудь первинним двигуном, внаслідок перетинання провідниками обмотки якоря магнітного поля полюсів, у відповідності з законом електромагнітної індукції, в останній наводиться ЕРС.

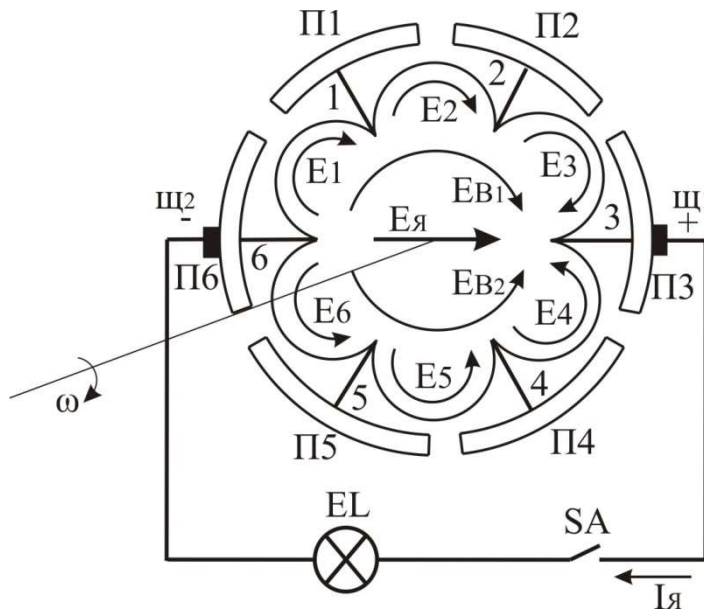


Рис. 7.7. Схема обмотки якоря

Всі секції якоря (1-6 на рис. 7.7) з'єднані в загальне коло і приєднані до колекторних пластин П1-П6. Щітки щ₁ і щ₂, доторкуючись протилежних пластин, ділять обмотку на дві паралельні вітки. При обертанні якоря ЕРС рамок складаються в ЕРС вітки $E_{B1} = E_1 + E_2 + E_3$ і $E_{B2} = E_4 + E_5 + E_6$. Через симетрію $E_{B1} = E_{B2} = E_{я}$, де $E_{я}$ – ЕРС якоря, що діє між щітками. ЕРС секції (рамки) $E_p = 2BlV$. Так як $B \equiv \Phi$ (Φ – потік одного полюса), $V \equiv n$ або $V \equiv \omega$ (n – частота обертання якоря, об/хв; ω – кутова частота рад/с), то

$$E_{я} = C_E \Phi n \quad (7.14)$$

$$\text{або } E_{я} = C'_E \Phi \omega, \quad (7.15)$$

де C_E і C'_E – конструктивні постійні для даної машини коефіцієнти.

Отже, при обертанні якоря виникає ЕРС якоря, пропорційна магнітному потоку і частоті обертання. ЕРС, що утворюється на щітках генератора називається напругою. Таким чином, напруга, яку розвиває будь-який ГПС, прямо пропорційна числу його обертів і величині магнітного потоку, який утворюється полюсами; магнітний же потік залежить від струму в обмотці збудження.

В залежності від способу збудження генераторів постійного струму розрізняють генератори з незалежним збудженням і генератори з самозбудженням.

У генераторів з незалежним збудженням обмотки збудження живляться постійним струмом від стороннього джерела, а у генераторів з самозбудженням – безпосередньо від затискачів якоря самої машини. На практиці в основному використовуються генератори з самозбудженням, які

мають більш просту конструкцію і невимогливість експлуатації. В залежності від способу вмикання обмоток збудження ГПС з самозбудженням розрізняють на генератори з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

Найбільш розповсюдженими на виробництві являються генератори постійного струму з паралельним збудженням. Коло обмотки збудження генератора приєднується паралельно з навантажувальним опором R_H , звідки і назва з паралельним збудженням.

На рис. 7.8 показана схема ГПС з паралельним збудженням.

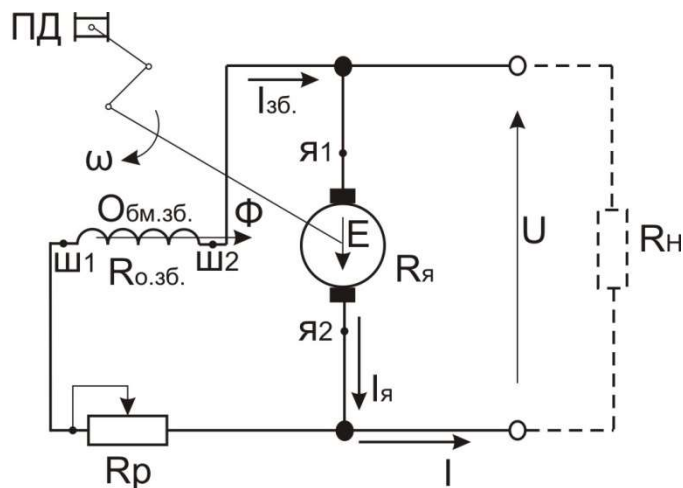


Рис. 7.8. Схема генератора постійного струму з паралельним збудженням

На рис. 7.8. подані, установлені стандартом, позначення затискачів: обмотка якоря, що теж саме, виводи генератора – Я1 і Я2, паралельної обмотки (шунтової) – Ш1 і Ш2.

При обертанні якоря, як відомо, в його обмотці виникає ЕРС E , напрям якої залежить від напрямку обертання якоря. При роботі в режимі генератора електрична машина виконує функції джерела енергії, через це струм якоря $I_я$, що виникає в колі якоря повинен співпадати за напрямом з індукованою в ньому ЕРС E . Це може відбуватися тільки з відповідним напрямком обертання якоря. Якщо цей напрям не буде витриманим, генератор втрачає властивість до самозбудження. Через це виробником ГПС на кришці підшипникового щита з боку вала машини викарбувана стрілка, що вказує на напрям обертання якоря.

Як видно із схеми рис. 7.8, струм якоря розгалужується за двома паралельними вітками. В колі обмотки збудження протікає струм збудження $I_{зб.}$, для регулювання якого вмикається регулювальний опір R_p . Співвідношення між силою струму в якорі $I_я$, обмотці збудження $I_{зб.}$ і

зовнішньому колі I при навантаженні визначається за першим законом Кірхгофа:

$$I_{я} = I + I_{зб}. \quad (7.16)$$

Обмотку збудження генераторів з паралельним збудженням виконують із великої кількості витків тонкого проводу. Це дозволяє одержати необхідні для утворення потрібного магнітного потоку ампервитки при відносно невеликому струмі збудження. Для сучасних МПС струм збудження складає біля 1...5% номінального значення струму якоря.

Розглянемо принцип самозбудження генераторів постійного струму. Обов'язковою умовою для того, щоб генератор постійного струму мав змогу самозбуджуватись є наявність у його магнітному колі залишкового магнетизму.

Дійсно, як видно із приведеної схеми (рис. 7.8), обмотка збудження генератора підключена до щіток самого же генератора, і через це струм збудження може виникнути і підтримуватись у колі збудження машини тільки при наявності різниці потенціалів на її щітках. Якщо у машини існує залишковий магнетизм, то при обертанні якоря машини витки обмотки якоря будуть перетинати магнітні лінії магнітного потоку створеного залишковим магнетизмом, у результаті чого буде наводитись залишкова ЕРС ($E_{зал}$). Виникнення цієї ЕРС убумовить різницю потенціалів на щітках машини і викличе появу струму у колі збудження. Цей струм збудження підсилить магнітний потік машини, що в свою чергу збільшить ЕРС машини, а це приведе до подальшого підвищення струму збудження і, таким чином, процес буде розвitatись з поступовим наростанням до усталеного режиму холостого ходу при розімкненому зовнішньому колі.

Напруга на затискачах генератора в цьому разі буде меншою від ЕРС генератора на величину спаду напруги в обмотці якоря

$$U = E - I_{я}R_{я}, \quad (7.17)$$

де $R_{я}$ – опір обмотки якоря.

Сила струму в обмотці збудження

$$I_{зб} = \frac{U}{R_{о.зб.}}, \quad (5.18)$$

де $R_{о.зб.}$ – опір кола збудження.

Якби у машині був відсутній залишковий магнетизм, то, не дивлячись на обертання якоря машини, ЕРС в його обмотці не виникала б, а напруга на щітках залишилась би рівною нулю, а отже, і струм у колі збудження був би відсутнім, машина не мала б можливості до збудження і утворення напруги U на навантаженні R_H (рис. 7.8).

На практиці бувають випадки, коли генератор, призначений для роботи за схемою з самозбудженням виявляється втратившим залишковий

магнетизм, таке явище може виникнути або від струсу машини, або від неправильного вмикання кола збудження, що призводить до розмагнічування машини.

Для того щоб у таких випадках відновити поле залишкового магнетизму машини і тим самим зробити її знову здатною до самозбудження, необхідно виконати збудження машини від стороннього джерела за схемою незалежного збудження. При цьому необхідно звертати увагу на відновлення попередньої полярності машини за заданим напрямом її обертання.

Розглянемо тепер основні характеристики генераторів постійного струму, такими характеристиками є характеристика холостого ходу і зовнішня характеристика.

Характеристика холостого ходу – залежність ЕРС генератора від струму збудження при розімкненому зовнішньому колі, тобто коли $I=0$, і при незмінній швидкості обертання машини, тобто при $n=\text{const}$.

На рис 7.9.а показана характеристика холостого ходу генератора постійного струму з паралельним збудженням – початок характеристики при $E=E_{\text{зал}}$.

Ця характеристика може починатись з нуля, як це показано на рис. 5.9.а пунктиром, у тих випадках, коли в машині відсутнє залишкове намагнічення.

Аналізуючи характеристику холостого ходу, можна бачити, що на початку при невеликих струмах збудження ЕРС зростає пропорційно зміні струму збудження, про те в подальшому із зростанням струму збудження ця лінійна залежність порушується і характеристика приймає вигляд властивий кривим намагнічування. Нескладно встановити, що по суті характеристика холостого ходу являє собою не що інше, як криву намагнічування магнітного кола машини.

Другою істотною характеристикою для генераторів постійного струму є зовнішня характеристика, що відображає зміну напруги на затискачах машини при зміні струму в колі якоря, тобто залежність $U(I)$ при $I_{\text{зб}}=\text{const}$ і $n=n_{\text{ном}}=\text{const}$. На рис. 7.9.б показана зовнішня характеристика генератора постійного струму паралельним збудженням.

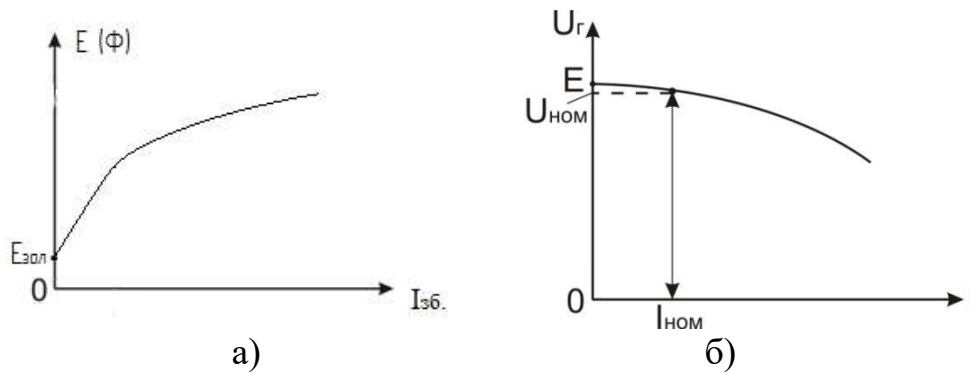


Рис. 7.9. Характеристика генератора постійного струму з паралельним збудженням: а) холостого ходу; б) зовнішня характеристика

При вмиканні генератора на навантаження (в мережу постійного струму) сила струму у зовнішньому колі буде

$$I = \frac{U}{R_H}, \quad (7.19)$$

де R_H – опір зовнішнього кола.

Повна потужність, яку розвиває генератор

$$P_1 = EI_{\text{я}} \quad (7.20)$$

Корисна потужність, яку генератор віддає у мережу

$$P_2 = UI. \quad (7.21)$$

Напруга U на затискачах генератора буде зменшуватись, причому, чим більше буде струм навантаження, тим більше напруга буде відрізнятись від ЕРС.

Аналітичний вираз для зовнішньої характеристики можна одержати із рівняння 7.17.

Нехтуючи відносно невеликою величиною струму збудження, без особливої похибки можна прийняти $I = I_{\text{я}}$.

З урахуванням цього, рівняння зовнішньої характеристики запишеться у вигляді

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (7.22)$$

Рівняння 7.22 є рівнянням електричної машини в режимі генератора постійного струму.

Зменшення напруги на затискачах генератора з паралельним збудженням із збільшенням струму навантаження обумовлено наступними основними причинами: 1) зі збільшенням струму навантаження збільшується спад напруги на обмотках якоря – $R_{\text{я}} I_{\text{я}}$; 2) зі збільшенням навантаження внаслідок реакції якоря виникає зменшення магнітного потоку, а відповідно, і ЕРС якоря.

В навантаженій машині струм, що протікає по провідникам якоря, утворює особисте магнітне поле, поле якоря. Магнітне поле якоря, накладається на поле, що створюється обмоткою збудження і викривляє його. Вплив, який чинить магнітне поле якоря на загальне поле машини, називається реакцією якоря електричної машини.

Реакція якоря визиває небажані наслідки: сильне іскріння на колекторі під щітками струмознімального механізму, що призводить до порушень номальної рооти машини і може нагріти колектор до аварійного стану, зменшує ЕРС генератора, що призводить до додаткового зменшення напруги на затискачах при збільшенні його навантаження.

Основним засобом послаблення реакції якоря є застосування компенсаційної обмотки, яка розташовується у полюсах машини і з'єднується послідовно з колом якоря.

Магнітне поле утворене струмом компенсаційної обмотки має напрямок назустріч магнітному полю обмотки якоря. Відповідним вибором числа витків компенсаційної обмотки досягають практично повної компенсації реакції якоря.

Робота машин постійного струму часто супроводжується іскрінням між щітками і колектором. Сильне іскріння може призвести до колового вогню і робить нормальну роботу машини неможливою.

Причинами іскріння можуть бути механічні дефекти: шорстка поверхня колектора, слабкий тиск щіток, забруднення колектора, вібрації та інші несправності, що призводять до порушення, в окремі моменти часу, контакту щіток з колектором.

У процесі експлуатації бувають випадки, коли машина у справному стані, у механічному відношенні, сильно іскрить. Причиною іскріння тут є фізичний процес, що відбувається при переході щітки від одної колекторної частини на другу. У результаті швидкої зміни струму в секції виникає ЕРС самоіндукції e_1 величина якої чим більше, тим вища швидкість обертання якоря. Комплекс явищ, що пов'язаний зі зміною напрямлення струму в замкнених щіткою секціях якорної обмотки, називається комутацією.

Основним засобом зниження комутаційного іскріння є використання додаткових полюсів (див. рис. 7.5.). Магнітний потік цих полюсів індукує в рухомій комутаційній секції ЕРС e_k , направлену на зустріч e_1 , так що $e_k + e_1 \approx 0$. Цим досягається усунення виникнення недопустимого іскріння.

Сучасні електромашинобудівні підприємства випускають генератори постійного струму серії П потужністю від 0,37 кВт до 230 кВт на напруги 110, 115, 160, 230, 320 і 460 В.

7.3.6. Двигуни постійного струму, параметри та характеристики для практичного використання

Електродвигун постійного струму (ДПС) – електрична машина, призначена для перетворення електричної енергії постійного струму в енергію механічну.

ДПС в конструктивному відношенні не відрізняються від генератора постійного струму (див. рис. 7.6.).

При подачі постійної напруги на затискачі обмотки якоря двигуна в обмотках збудження та якоря виникне струм. У результаті взаємодії струму якоря з магнітним потоком, утвореним обмоткою збудження в магнітопроводі станини, виникає електромагнітний момент електродвигуна, під дією якого якор починає обертатись. При цьому електромагнітний момент, що розвиває двигун буде

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (7.23)$$

де C_M – конструктивний коефіцієнт;

Φ – робочий магнітний потік одної пари головних полюсів;

$I_{\text{я}}$ – струм якоря двигуна.

При обертанні якоря в його обмотці в результаті перетинання магнітних силових ліній наводиться ЕРС E , яка при роботі машини в режимі двигуна має напрямок проти струму якоря і, так же як і при роботі машини в режимі генератора, дорівнює

$$E = C_E \Phi n, \quad (7.24)$$

де C_E – коефіцієнт, залежний від конструкційних елементів машини.

Якщо швидкість обертання якоря n в об/хв виразити через частоту обертання ω в рад/с, а M момент в Нм (ньютонометрах), то конструкційні коефіцієнти зрівнюються

$$C_M = C_E = \frac{pN}{2\pi a} = k,$$

де p – кількість пар полюсів машини;

a – кількість пар паралельних віток обмотки якоря;

N – кількість активних провідників обмотки якоря.

Якщо $\Phi = const$, що має місце у нерегульованих двигунах паралельного або незалежного збудження, тоді

$$M = k\Phi I_{\text{я}} = CI_{\text{я}} \quad (7.25)$$

$$E = k\Phi\omega = C\omega, \quad (7.26)$$

де $C = k\Phi$.

Рівняння електричної машини в режимі двигуна для якірного кола буде відрізнятися від аналогічного рівняння генератора постійного струму знаком між членами правої частини рівняння (7.22).

$$U_{я} = E + I_{я}R_{\Sigma}, \quad (7.27)$$

де $R_{\Sigma} = R_{я} + R_{д\text{я}}$ – повний опір кола якоря.

За рівнянням (7.24) швидкість обертання електродвигуна

$$n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U - IR_{я}}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_{я}}{C_E^2 \Phi^2} \cdot M,$$

де M – електромагнітний обертальний момент, що відповідає моменту навантаження на валу двигуна.

Як видно із приведеного рівняння, швидкість обертання двигуна можна регулювати шляхом змінюваності напруги живлення U , величини магнітного потоку Φ (струму збудження) і опору кола якоря $R_{я}$. Всі ці методи знаходять застосування в практиці використання електричних машин постійного струму в системах електропривода і будуть розглянуті в подальшому викладенні матеріалу цього розділу.

Основні характеристики двигунів постійного струму визначаються їх конструктивними особливостями і схемою вмикання системи збудження. В залежності від способу вмикання обмотки збудження розрізняють електродвигуни постійного струму з незалежним, паралельним, послідовним і мішаним збудженням.

На рис. 7.10 приведена принципова схема електродвигуна з перемикачем SA на два положення:

1) якщо перемикач SA знаходиться в положенні 1 двигун підмикається до основного джерела живлення (робоча напруга) U і обмотка збудження $O_{зб}$ ввімкнена паралельно колу якоря. Паралельно ввімкнена обмотка збудження називається шунтовою і на щитку двигуна позначається буквами Ш1 (початок обмотки) і Ш2 (кінець). Якщо помилково поміняти містами Ш1 та Ш2 – двигун збуджуватись не буде й не прийме навантаження. При правильному з'єднанні двигун буде працювати в режимі паралельного збудження (самозбудження). У разі перемикання перемикача SA в положення 2 – обмотка збудження двигуна підмикається до незалежного джерела живлення, призначеного тільки для живлення обмотки збудження $O_{зб}$ і двигун буде працювати в режимі незалежного збудження (робоча напруга U залишається в роботі).

На рис. 7.11 приведена принципова схема вмикання в мережу електродвигуна з послідовним збудженням.

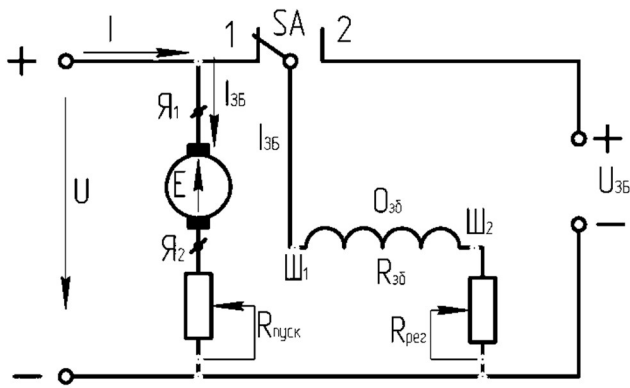


Рис. 7.10. Схема вмикання обмотки збудження двигуна постійного струму: перемикач SA знаходиться в положенні 1- паралельне збудження (самозбудження), в положенні 2- незалежне збудження

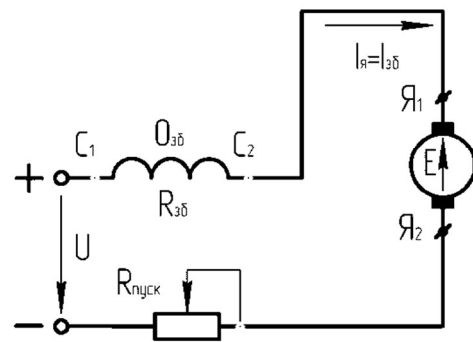


Рис. 7.11. Схема вмикання електродвигуна з послідовною обмоткою збудження

Обмотка збудження (рис. 7.11) вмикається послідовно з колом якоря і має позначення в схемах і на щитку двигуна C1 і C2 (серієсна). Послідовна (серієсна) обмотка розрахована на повний робочий струм якоря, тобто номінальний струм навантаження дорівнює номінальному струму обмотки збудження $I_{я} = I_{зб}$.

При незалежному і паралельному збудженні магнітний потік слабо залежить від навантаження і при зміні навантаження в процесі роботи двигуна його швидкість змінюється мало, а тому швидкісні характеристики $\omega(I_{я})$ і механічні характеристики $\omega(M)$ є «жорсткими» (див. рис. 7.13 і 7.14).

При послідовному збудженні струм якоря являється струмом збудження і магнітний потік змінюється із зміною навантаження. В результаті із збільшенням навантаження швидкість двигуна різко падає (характеристика 3, рис. 7.13, 7.14). Така характеристика називається м'якою.

Двигуни послідовного збудження застосовуються на електричному транспорті (тягові двигуни) і в підймальних установках (кранові двигуни), так як у цих механізмах потрібний великий обертальний момент, особливо в період пуску.

У тих випадках, коли необхідно одночасно використати переваги двигуна з послідовним збудженням (великий обертальний момент при

пуску) і двигуна з паралельним збудженням (можливість працювати при малих навантаженнях), застосовують двигуни мішаного збудження.

На рис.7.12 приведена схема вмикання двигуна зі мішаним збудженням. Як видно з рисунка, ці двигуни мають дві обмотки збудження – послідовна С1, С2 і паралельна Ш1,Ш2.

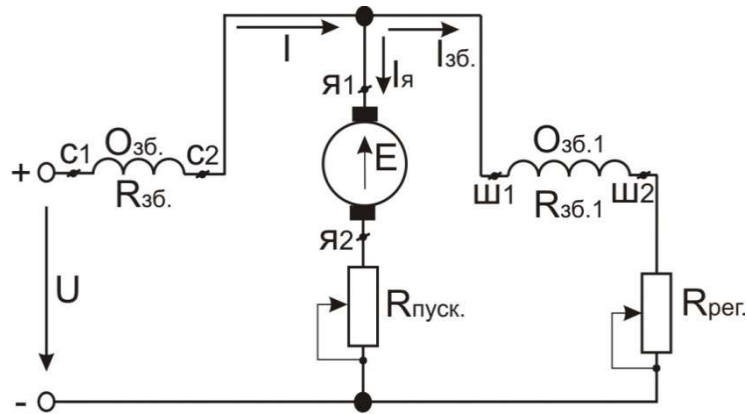


Рис. 7.12. Схема вмикання двигуна постійного струму з мішаним збудженням

В залежності від питомої ваги намагнічуючих сил послідовної і паралельної обмоток збудження швидкісні та механічні характеристики двигунів мішаного збудження наближаються до характеристик двигунів послідовного або паралельного збудження.

Одним із важливих режимів роботи двигуна постійного струму є пусковий режим. При пуску електродвигуна (незалежно від способу збудження) шляхом прямого вмикання в мережу живлення, двигун знаходиться в режимі короткого замикання ($\omega=0$, $E=0$) і пусковий струм, він же струм короткого замикання, визначається за формулою

$$I_{\text{п.}} = I_{\text{кз}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$$

Опір якоря $R_{\text{я}}$ – занадто мала величина і досягає частки або одиниць Ом, і тому струм $I_{\text{п}}$ досягає 10...50 кратного значення номінального струму двигуна $I_{\text{н}}$, в той же час допустиме значення пускового струму $I_{\text{доп}} = (2...2,5)I_{\text{н}}$. Через це пуск ДПС здійснюється з використанням спеціальних пускових пристосувань – пускових реостатів з відповідним опором $R_{\text{пуск.}}$ (див. рис. 7.10).

Опір резистора $R_{\text{пуск.}}$ визначається методом обмеження струму. Струм у колі якоря в момент пуску $I_{\text{п}}$ буде зумовлений опорами $R_{\text{я}}$ та $R_{\text{пуск.}}$, тобто

$$I_{II} = I_{K3} = \frac{U}{R_{Я} + R_{пуск.}} \quad (5.28)$$

Враховуючи, що величина пускового струму не повинна перевищувати значення $2,5I_H$ із формули 7.28, одержимо

$$R_{пуск.} = \frac{U}{2,5I_H} - R_{Я} \quad (7.29)$$

Пусковий резистор $R_{пуск.}$ вмикається в коло якоря тільки на момент пуску двигуна. По мірі розгону електродвигуна ЕРС, що наводиться в обмотці якоря, внаслідок підвищення частоти його обертання ω підвищується ($E=C\omega$), струм якоря при інших рівнозначних умовах зменшується, і опір пускового реостату $R_{пуск.}$ необхідно поступово зменшувати. Після закінчення розгону двигуна до номінального значення частоти обертання якоря ЕРС виросте настільки, що пусковий опір може бути доведено до нуля.

Таким чином, пусковий опір $R_{пуск.}$ у колі якоря необхідний тільки в режимі пуску двигуна. Після досягнення номінальної частоти обертання електродвигуна пусковий опір повинен бути виведеним із роботи.

Електромеханічні властивості ДПС визначають швидкісні або електромеханічні і механічні характеристики. Характеристики бувають природними і штучними. Природні характеристики визначаються паспортними даними машини. Характеристики одержані зміною параметрів двигуна називаються штучними.

Для електродвигуна постійного струму з паралельним збудженням у відповідності з другим законом Кірхгофа для якійного кола (див. рис.7.10) рівняння електричної рівноваги має вигляд

$$E = U_{Я} - R_{Я}I_{Я} \quad (7.30)$$

З урахуванням виразу для E (див. формулу 7.26) $E = C\omega$, запишемо останню формулу відносно частоти обертання, одержимо рівняння швидкісної (електромеханічної) характеристики $\omega(I_{Я})$:

$$\omega = \frac{U_{Я}}{C} - \frac{R_{Я}}{C}I_{Я} \quad (7.31)$$

Формулу механічної характеристики $\omega(M)$ ДПС одержимо із (7.31) заміною струму $I_{Я}$ на момент за виразом (7.25) $M = CI_{Я}$:

$$\omega = \frac{U_{Я}}{C} - \frac{R_{Я}}{C^2}M \quad (7.32)$$

При розрахунках величини коефіцієнта C можна скористатися формулою (7.30) якщо в ній замінити $E = C\omega$ і всі величини виразити номінальними значеннями (з індексом n).

$$U_H = C\omega_H + I_{яH}R_я$$

$$C = \frac{U_H - I_{яH}R_я}{\omega_H} \text{ В} \cdot \text{с/рад}. \quad (7.33)$$

Номинальні дані величин, що входять до виразу (7.33) приводяться в паспорті двигуна або на щитку, що закріплений на статорі двигуна.

Якщо номінальна швидкість обертання $n_{ном}$ задана в об/хв, то частота обертання $\omega_{ном}$ в радіане секунду буде $\omega_H = \frac{2\pi n_{ном}}{60} \text{ рад/с}$.

При відсутності значення величини опору $R_я$, його можна визначити приблизно за формулою

$$R_я \approx 0,5R_H(1 - \eta_H), \quad (7.34)$$

$$\text{де } R_H = \frac{U_H}{I_H}; \eta_H = \frac{P_H}{I_H U_H}.$$

Із виразів (7.31) і (7.32) випливає, що при відсутності навантаження на валу $M = 0$ і струму $I_я = 0$ частота обертання електродвигуна при даному значенні напруги живлення

$$\omega = \frac{U_я}{C} = \frac{U_я}{k\Phi} = \omega_0. \quad (7.35)$$

Частота обертання електродвигуна ω_0 є частотою обертання ідеального холостого ходу. Вона залежить від параметрів електродвигуна, а також від значення напруги живлення і магнітного потоку (див. вираз 7.35). Із зменшенням магнітного потоку при інших рівнозначних умовах частота ідеального холостого ходу збільшується. Через це (необхідно запам'ятати!) у випадку обриву кола обмотки збудження, коли струм збудження становиться рівним нулю ($I_{зб} = 0$), магнітний потік двигуна знизиться до значення, рівного значенню залишкового магнітного потоку $\Phi_{зал}$. Оскільки частота обертання двигуна ω обернено пропорційна магнітному потоку (див. 7.35), то в разі $I_{зб} = 0$ і $\Phi = 0$ – двигун іде в розліт, так як частота обертання набуває величини набагато більшої ніж номінальне її значення, а це може привести до повного руйнування двигуна і викликає певну небезпеку як для електроустановки в цілому, так і для людей.

З урахуванням частоти обертання ідеального холостого ходу ω_0 формули швидкісної і механічної характеристик можна подати в наступному вигляді:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_я}{C} I_я = \omega_0 - \frac{R_я}{k\Phi} I_я, \quad (7.36)$$

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} M = \omega_0 - \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi)^2} M. \quad (7.37)$$

Швидкісна (частотна) характеристика електродвигуна постійного струму з паралельним збудженням $\omega(I_{\text{я}})$ при постійному значенні магнітного потоку $\Phi = \text{const}$ і постійній величині напруги живлення $U = \text{const}$ має вигляд прямої 1-(природна характеристика) (рис. 5.13). Із збільшенням навантаження на валу, тобто із збільшенням струму якоря $I_{\text{я}}$, частота обертання електродвигуна зменшиться на величину пропорційну спаду напруги на опорі кола якоря $R_{\text{я}}$.

Найбільше розповсюдження у виробництві має процес регулювання швидкості двигуна зміною магнітного потоку (див. формулу 7.36). Це досягається реостатом, що вмикається в коло обмотки збудження. При зменшенні струму збудження зменшується магнітний потік, отже, збільшується швидкість обертання двигуна. У цьому випадку регулювання відбувається за сталою потужністю. Вмикання реостата в коло обмотки збудження не викликає значних втрат енергії завдяки невеликій величині струму збудження. В двигунах паралельного збудження обмотка збудження має великий опір і, сила струму у цій обмотці і реостаті невелика.

Відмітимо найбільш характерні особливості двигуна з паралельним збудженням:

1. Швидкість обертання якоря при зміні навантаження у межах від холостого ходу до номінального незначна (практично залишається незмінною), (дивись характеристику 1 на рис. 7.13), такий вид характеристики називається жорсткісною характеристикою.

2. Двигун може працювати вхолосту без навантаження. При цьому обмотка збудження повинна бути ввімкнена на повну напругу мережі живлення.

3. Обертальний момент електродвигуна пропорційний силі струму якоря, оскільки магнітний потік залишається постійним.

4. Струм, що споживається з мережі, прямо пропорціональний навантаженню двигуна.

5. Якщо електродвигун з паралельним збудженням працює без навантаження, то при обриві кола збудження він розвиває недопустиму швидкість обертання, а тому в схемах керування двигуном повинна бути передбачена система захисту від обриву кола збудження, тобто від втрати струму у колі збудження.

6. Для зміни напрямку обертання електродвигуна постійного струму необхідно змінити полярність напруги живлення, що підводиться до якоря або полярність обмотки збудження. На практиці в більшості випадків користуються останнім способом.

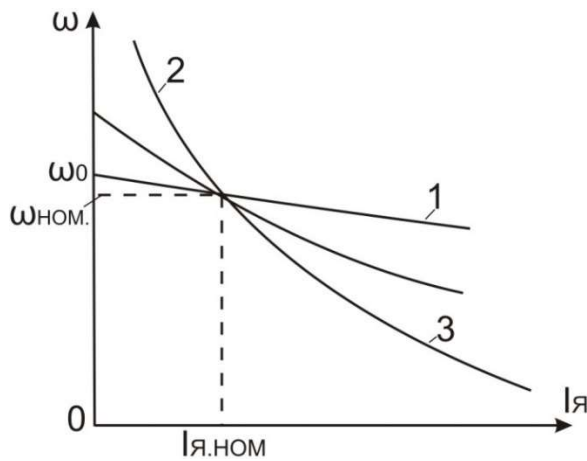


Рис. 7.13. Швидкісні характеристики електродвигуна постійного струму з різними способами збудження:
1 – паралельним (незалежним);
2 – послідовним;
3 – мішаним

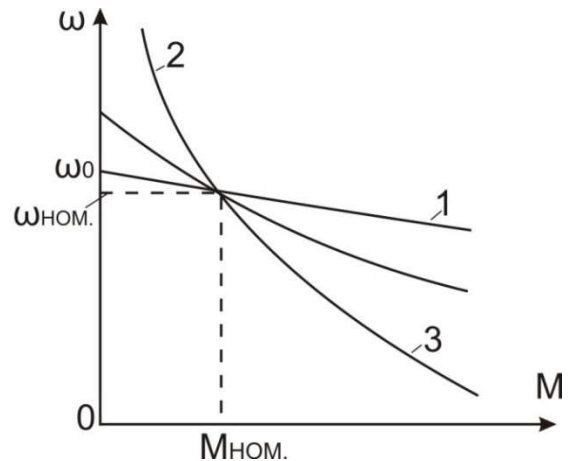


Рис. 7.14. Механічні характеристики електродвигуна постійного струму з різними способами збудженням:
1 – паралельним (незалежним);
2 – послідовним;
3 – мішаним

Для електродвигуна з послідовним збудженням (див. рис. 7.11) рівняння електричної рівноваги за другим законом Кірхгофа має вигляд

$$U = E + (R_{\text{я}} + R_{\text{зб}})I_{\text{я}}, \quad (7.38)$$

де $R_{\text{зб}}$ – опір обмотки послідовного збудження двигуна.

З урахуванням того, що $E = k\Phi\omega = C\omega$ рівняння швидкісної характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням приводиться до такого вигляду:

$$\omega = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{зб}})I_{\text{я}}}{k\Phi} = \frac{U - R_{\Sigma\text{Я}}I_{\text{я}}}{C}. \quad (7.39)$$

Як видно із рівняння (7.39), частота обертання цього двигуна залежить також від опору обмотки збудження $R_{\text{зб}}$.

Прийmemo до уваги те, що у двигунів постійного струму з послідовним збудженням зі зміною струму якоря внаслідок зміни магнітного потоку (в результаті зміни струму якоря, від якого він залежить) швидкісна характеристика буде мати вигляд, показаний на рис. 7.13 (крива 2).

Із рівняння (7.39) також видно, що із зменшенням навантаження, тобто із зменшенням струму якоря $I_{\text{я}}$, як наслідок цього, зі зменшенням магнітного потоку частота обертання двигуна постійного струму з послідовним збудженням стає настільки великою, що двигун іде в розліт і може зруйнуватись. Тому не можна вмикати електродвигун з послідовним

збудженням вхолосту або при малому навантаженні. Не допускається також застосовувати ремінну передачу, оскільки пас може зіскочити, і двигун піде в розліт.

Регулювати швидкість обертання двигуна можна зміною напруги, що підводиться до затискачів двигуна, або зміною магнітного потоку, шунтуванням обмотки збудження.

Двигуни з послідовним збудженням застосовуються в тролейбусах, трамваях, електровозах, підйомних кранах, електрокарах.

В будівельній практиці двигуни послідовного збудження застосовують на деяких типах потужних екскаваторів з живленням від двигунів-генераторів і на електричних навантажувачах з живленням від батареї акумуляторів.

Двигун постійного струму зі мішаним збудженням, крім обмотки паралельного збудження, магнітний потік якої $\Phi_1 = const$ при постійному значенні напруги $U = const$, має послідовну обмотку збудження, магнітний потік Φ_2 якої залежить від струму якоря, тобто від його навантаження. У відповідності з другим законом Кірхгофа для якірного кола електродвигуна зі мішаним збудженням (див. рис. 7.12) рівняння електричної рівноваги і рівняння швидкісної характеристики мають такий же вигляд, як і відповідні рівняння, записані для двигуна з послідовним збудженням. Внаслідок того що електродвигуни зі мішаним збудженням мають дві обмотки збудження, результативний магнітний потік виявляється рівним сумі магнітних потоків, що утворюються послідовною і паралельною обмотками:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (7.40)$$

де Φ_1, Φ_2 – магнітні потоки утворені паралельною і послідовною обмотками збудження.

При узгодженому вмиканні обмоток збудження швидкість обертання двигуна визначається за формулою

$$\omega = \frac{1}{k} \cdot \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{пос}})}{\Phi_1 + \Phi_2}, \quad (7.41)$$

де $R_{\text{пос}}$ – опір послідовної обмотки збудження.

Завдяки наявності двох обмоток збудження (послідовної і паралельної) властивості електродвигунів постійного струму із мішаним збудженням являють собою щось середнє між властивостями двигунів постійного струму з паралельним і послідовним збудженням. Через це швидкісна характеристика електродвигуна із мішаним збудженням (див. рис. 7.13, крива 3), розташована між швидкісними характеристиками двигунів постійного струму з паралельним і послідовним збудженням. Електродвигуни зі мішаним збудженням володіють покращеними характеристиками в порівнянні з двигунами з послідовним збудженням і

при відсутності навантаження на валу не йдуть в розліт, так як частота обертання обмежується при цьому частотою обертання ідеального холостого ходу $\omega_0 = U_{\text{я}} / k\Phi_2$.

Механічні характеристики ДПС мають такий же вигляд, як і відповідні швидкісні характеристики (див. рис. 7.14). Електродвигун з паралельним збудженням має жорстку механічну характеристику (крива 1), його частота обертання зі збільшенням моменту навантаження зменшується незначно, так як струм збудження при паралельному вмиканні обмотки збудження і відповідно магнітний потік двигуна залишаються практично незмінними, а опір кола якоря відносно мала величина.

Двигуни постійного струму з послідовним збудженням мають м'яку механічну характеристику (крива 2), оскільки із зміною моменту навантаження на валу змінюється струм якоря, а отже, і магнітний потік двигуна.

Двигуни постійного струму з мішаним збудженням мають більш м'яку механічну характеристику (крива 3), ніж двигуни з паралельним збудженням, і більш жорстку, ніж двигуни з послідовним збудженням.

Задача 7.1. Електрорушійна сила генератора з паралельним збудженням $E = 120\text{В}$, напруга на затискачах $U = 116\text{В}$, опір обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,2\text{ Ом}$ і $R_{\text{зб}} = 58\text{ Ом}$. Визначити:

R – опір зовнішнього кола,

$I_{\text{я}}$ – струм якоря,

$I_{\text{о.зб.}}$ – струм в обмотці збудження,

I – струм зовнішнього кола,

$P_{\text{заг.}}$ – загальну потужність, що розвиває генератор,

$P_{\text{кор.}}$ – корисну потужність,

η – ККД генератора.

Розв'язання.

1. Для визначення опору R зовнішнього кола необхідно визначити струм зовнішнього кола (із формули (7.16))

$$I = I_{\text{я}} - I_{\text{зб}} = 20 - 2 = 18\text{ А},$$

$$\text{де } I_{\text{зб}} = \frac{U}{R_{\text{зб}}} = \frac{116}{58} = 2\text{ А}.$$

Струм якоря визначимо із рівняння електричної рівноваги якірного кола, вираз (7.22)

$$I_{\text{я}} R_{\text{я}} = E - U = 120 - 116 = 4\text{ В}$$

$$I_{\text{я}} = \frac{4}{0,2} = 20\text{ А}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{116}{18} = 6,44 \text{ Ом}$$

2. Загальна потужність

$$P_{\text{заг}} = EI_{\text{я}} = 120 \cdot 20 = 2,4 \text{ кВт}$$

3. Корисна потужність

$$P_{\text{кор}} = UI = 116 \cdot 18 = 2,088 \text{ кВт}$$

4. ККД $\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{заг}}} = \frac{2,088}{2,4} = 0,87$.

Задача 7.2. Для електродвигуна типу 2ПФ, що має такі дані: $P_H = 30 \text{ кВт}$, $U_H = 440 \text{ В}$, $I_H = 75,7 \text{ А}$, $\eta = 90\%$, визначити опір обмотки якоря $R_{\text{я}}$ і опір пускового реостату $R_{\text{п}}$, який необхідно ввімкнути в коло якоря, щоб струм якоря при пуску $I_{\text{п}} = 2,5I_H$.

Розв'язання.

1. Опір обмотки якоря (див. формулу 7.34)

$$R_{\text{я}} = 0,5 \frac{U_H}{I_H} (1 - 0,9) = 0,5 \cdot \frac{440}{75,7} \cdot 0,1 = 0,29 \text{ Ом}$$

2. Опір пускового реостату визначається за законом Ома

$$I_{\text{п}} = \frac{U_H}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}, R_{\text{п}} = \frac{U_H}{I_{\text{п}}} - R_{\text{я}} = \frac{440}{2,5 \cdot 75,7} - 0,29 = 2 \text{ Ом}$$

$$U_{\text{д}} = U_H - I_{\text{п}} R_{\text{п}} = U_H - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}} \cdot I_{\text{п}} U_H = U_H - \frac{2,5 U_H \cdot 2}{0,29 + 2} \cdot 0,9 = U_H - \frac{9}{10} U_H = \frac{1}{10} U_H$$

Задача 7.3. Обмотка збудження двигуна постійного струму з паралельним збудженням помилково виявилася ввімкненою неправильно, як зображено на рис. 7.15.

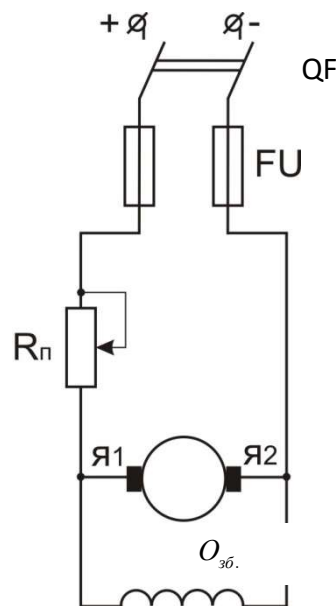


Рис.7.15. Неправильне вмикання обмотки збудження у коло якоря.

Як буде поводити себе двигун після ввімкнення його в мережу у випадку коли момент навантаження:

а) $M_{нав.} = 0$;

б) $M_{нав.} = 0,5M_H$,

Якщо $R_{\Pi} = 9R_{Я}$, $I_{\Pi} = 2,5I_H$.

Розв'язання.

1. Пусковий струм якоря двигуна

$$I_{\Pi} = \frac{U_H}{R_{Я} + R_{\Pi}}$$

2. Напряга на затискачах якоря Я1 – Я2 менше напруги мережі на величину спаду напруги в пусковому реостаті.

$$U_{д} = U_H - I_{\Pi}R_{\Pi} = U_H - \frac{U_H}{R_{Я} + R_{\Pi}} \cdot R_{\Pi} = U_H - \frac{U_H}{R_{Я} + 9R_{Я}} \cdot 9R_{Я} = U_H - \frac{9}{10}U_H =$$

3. Номінальний струм збудження двигуна має місце при номінальній напрузі

$$I_{зб.н.} = \frac{U_H}{R_{зб}}$$

4. В даному випадку напруга на обмотці збудження дорівнює напрузі якоря, яка менша номінального в десять разів. Якщо допустити, що характеристика залежності магнітного потоку двигуна від струму збудження майже пряма лінія, то магнітний потік двигуна буде менше номінального також в десять разів. Момент, що розвиватиме двигун при пуску (див. рівняння (7.25)),

$$M_{\Pi} = k\Phi I_{\Pi} = k \frac{\Phi_H}{10} \cdot 2,5I_H = 0,25k\Phi_H I_H = 0,25M_H.$$

5. При пуску вхолосту (без навантаження) двигун піде в хід і розженеться до недопустимо великої швидкості, яка перевершить швидкість ідеального холостого ходу ω_0 в десять раз (див. формулу (7.35)),

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H}; \omega'_0 = \frac{U_H}{0,1k\Phi_H}; \omega'_0 = 10\omega_0.$$

6. При пуску під навантаженням з моментом $M_{нав.} = 0,5M_H$ двигун обертається не буде, так як момент, що розвиває двигун, менше моменту сил опору на валу.

$$M_{нав.} > M_{об.}; 0,5M_H > 0,25M_H.$$

Задача 7.4. Для двигуна постійного струму з паралельним збудженням П41У4, який має такі дані: $P_H = 1,5кВт$, $U_H = 220В$,

$n_H = 1000 \text{ об/хв}$, $\eta = 73\%$, побудувати природну механічну характеристику.

Розв'язання.

Визначаємо номінальні значення струму, моменту та кутової швидкості:

$$I_H = \frac{P_H}{\eta U_H} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{0,73 \cdot 220} = 9,3 \text{ А},$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{104,6} = 14,3 \text{ Нм},$$

де $\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,6 \text{ рад/с}$.

Кутова швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_H}{C} = \frac{220}{1,82} = 121 \text{ рад/с},$$

де C (див. рівняння 5.33).

$$C = \frac{U_H - I_H R_{\Sigma}}{\omega_H} = \frac{220 - 9,3 \cdot 3,19}{104,6} = 1,82 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

$$R_{\Sigma} = 0,5 \frac{U_H}{I_H} (1 - \eta_H) = 0,5 \frac{220}{9,3} (1 - 0,73) = 3,19 \text{ Ом}$$

За одержаними даними будуємо природну механічну характеристику (рис.7.16).

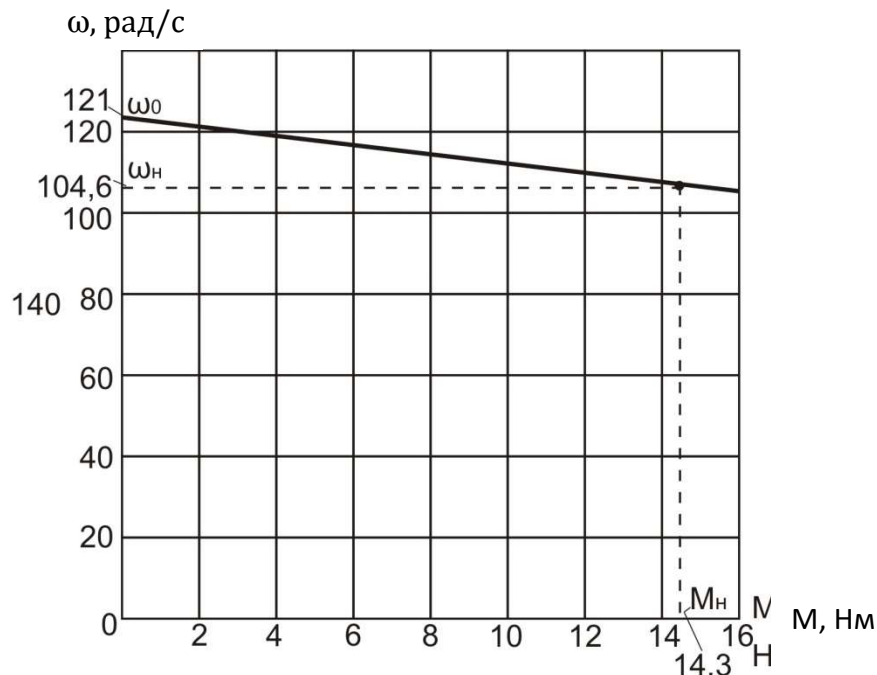


Рис. 7.16. Природна механічна характеристика двигуна П-41У4

Природна механічна характеристика двигуна, враховуючи її прямолінійність, будується за двома точками – точкою ідеального холостого ходу ($M=0$, $\omega=\omega_0=121\text{rad/s}$) і точкою, що відповідає номінальному режиму роботи ($M = M_H = 14,3\text{Нм}$, $\omega = \omega_H = 104,6\text{rad/s}$).

Як видно із рисунка 7.16, перепад швидкості $\Delta\omega$ від швидкості ідеального холостого ходу ω_0 до номінального значення ω_H (при навантаженні номінальним моментом) складає 13,6% або,

$$\omega = \omega_0 - \omega_H = 16,4\text{об/хв}.$$

7.4. Електричні машини змінного струму

7.4.1. Передумови розвитку та використання електричних машин змінного струму

Як уже відмічалось в розділі 4, розвиток машин змінного струму було безпосередньо пов'язано з розвитком електричного освітлення. До 1870-х років генератори змінного струму виконувались або як демонстраційні моделі, або на базі машин постійного струму із заміною колектора двома кільцями. В 1876 р. П. М. Яблочков сумісно із заводом Грамма створив декілька конструкцій генераторів змінного струму для живлення винайдених ним свічок. В цих генераторах якорь з робочою обмоткою був нерухомим, а на роторі розташовувалась система збудження – електромагніти, які отримували живлення через кільця постійним струмом. Котушки обмотки якоря з'єднувались таким чином, щоб ЕРС і струми одної вітки склалися (співпадали за фазою). Принципова схема цього генератора відповідала сучасним синхронним генераторам. Проте ріст потужності генераторів у початковий період був обмежений різким зростанням витрат в осердях котушок. Ці витрати настільки збільшувались з ростом потужності, що був випущений ряд машин без осердів. Звичайно, витрати при цьому знизилися, але різко збільшився магнітний опір, що зменшило ефективність машини і збільшило її розміри.

По мірі розповсюдження енергетичних систем змінного струму збільшувався інтерес до двигунів, працюючих на змінному струмі. Здавалось, що принципових труднощів немає, оскільки будь-яка, електрична машина зворотна. Вже у 1841 р. англійський фізик-винахідник Чарльз Уїтстон побудував модель синхронного двигуна. Труднощі, що виникають при запусканні однофазних синхронних двигунів, були нездоланими перешкодами для їх практичного використання. Через це першими двигунами змінного струму, що нашли практичне використання, були колекторні двигуни, аналогічні по конструкції машинам постійного струму.

Проте перші конструкції колекторних двигунів змінного струму мали значні втрати у збудження, ККД був низьким, а робота щіткового контакту була незадовільною.

На початок 1880 року в значній мірі уже була опрацьована конструкція машин постійного струму, з'явилися порівняно потужні генератори змінного струму. При спорудженні центральних електричних станцій і ліній електропередач різко проявили себе недоліки систем постійного і однофазного змінного струму. Крім того, відсутність простих і надійних двигунів змінного струму стримувало подальше розповсюдження систем змінного струму. Визначальним у подальшому розвитку електротехніки стало створення багатофазних двигунів змінного струму з обертовим магнітним полем, тобто полем, що обертається відносно створившої його системи.

У 1879 р. У. Бейлі створив прилад, в якому обертання магнітного поля здійснювалося нерухомою чотириполюсною системою електромагнітів, живлення яких здійснювалося від джерела постійного струму через спеціальний перемикач. При цьому на електромагніти подавалися чергувальні імпульси. Полюса намагнічувалися по колу, в результаті чого магнітне поле міняло напрямок у просторі. Над полюсами був підвішений мідний диск, що нагадувало постановку досліду відомого французького фізика Д. Араго (1824 р.). В досліді Араго мідний диск, що обертася біля магнітної стрілки заставляв її обертатися. Тоді ж спостерігалось і зворотне явище – обертання постійного магніту захоплювало за собою мідний диск. Вперше дав пояснення цьому явищу Фарадей, котрий показав, що в провідникових контурах (диску) наводиться ЕРС, і з'являються струми, що взаємодіють з магнітом. В приладі Бейлі диск обертася під дією нерухомої магнітної системи, що створювала обертове магнітне поле.

Явище обертового магнітного поля в сучасному розумінні цього явища було відкрито в 1888 р. майже одночасно і незалежно один від одного італійським вченим Г. Ферарісом і югославським вченим Ніколой Тесла, працювавшим в Америці. На його основі Тесла сконструював перший в історії двофазний асинхронний двигун. Він взагалі був першим, хто став експериментувати з багатофазними струмами та успішно розв'язав проблему генерування таких струмів.

Винахід Тесли знаменував собою початок нової ери в електротехніці і визвав до себе увагу у всьому світі. Уже в червні 1888р. фірма «Вестінгаус Електрик компанії» купила у нього за мільйон доларів всі патенти на двофазну систему. За системою Тесли фірмою було побудовано ряд електростанцій, із яких найбільшою була Ніагарська гідроелектростанція. Крім того, фірма «Вестінгаус» організувала на своїх заводах випуск асинхронних двигунів. Вони були набагато краще і

надійніше всіх існуючих до цього моделей, але не одержали широкого розповсюдження, та як виявились занадто невдало сконструйованими. Обмотка статора у них виконувалась у вигляді котушок, насаджених на виступаючі полюси. Невдалою була і конструкція ротора у вигляді барабана з двома взаємно перпендикулярними замкненими на себе котушками. Все це помітно знижувало якість двигуна як в момент пуску, так і в робочому режимі.

Двофазний струм не одержав подальшого поширення в зв'язку з тим, що в Європі на цей час були зроблені нові винаходи, що використовували більш досконалі трифазні системи. Найбільших успіхів в цій області добився електротехнік М.О. Доліво-Добровольський, котрий по праву, вважається засновником трифазної електротехніки.

В першому ж патенті Доліво-Добровольського від 8 березня 1889 року був заявлений ротор з білячою кліткою, котрий одержав назву короткозамкненим і будова його принципово не змінилась до теперішнього часу.

При розробці конструкції статора він відмовився від явно виражених полюсів і перейшов до розподільчої барабанної обмотки.

Свій перший трифазний асинхронний двигун Доліво-Добровольський збудував взимку 1889 року. Враження, створене першим запуском двигуна на керівництво фірми АЕГ, де працював Доліво-Добровольський, було величезним. Для багатьох стало очевидним, що довгий тернистий шлях створення промислового електродвигуна пройдений до кінця. По своїм технічним показникам двигуни Доліво-Добровольського перевершували всі існуючі тоді електромотори – володіючи дуже високим ККД, вони безвідмовно працювали в будь-яких режимах, були надійними і простими у використанні. Через це вони відразу одержали широке розповсюдження у всьому світі. З цього часу почалося бурхливе впровадження електродвигунів у всі сфери виробництва і загальна електрифікація промисловості.

7.4.2. Призначення та області використання машин змінного струму

Електричні машини змінного струму складають основу сучасної електроенергетики як у сфері виробництва, так і у сфері споживання та перетворення електричної енергії в корисну механічну роботу. За деяким винятком ці машини є безколекторними. Існують два види безколекторних машин змінного струму: синхронні та асинхронні.

Особливе місце займають синхронні машини генератори і двигуни великих потужностей від 100 кВт і вище. За допомогою синхронних генераторів виробляється практично вся електроенергія в світі. На гідравлічних, теплових і атомних електростанціях первинна механічна

енергія турбін перетворюється в електричну в синхронних гідро- і турбогенераторах. В теперішній час електромашинобудівельною промисловістю створені і працюють у виробництві турбогенератори потужністю 800 тис. кВт. Одиначна потужність гідрогенераторів досягає 600 тис. кВт. По тому ж принципу працюють самі малопотужні мініатюрні синхронні електродвигуни, потужність яких складають тисячні частки вата, і використовуються вони в системах обчислювальної техніки, автоматиці, телемеханіці та інформаційно-вимірjuвальних приладах, навіть в наручних годинниках.

Силові синхронні двигуни виготовляють потужністю від 40 до декількох тисяч кВт зі швидкістю обертання 500-3000 об/хв і використовують для електропривода, що потребує постійну незмінну швидкість обертання у всьому діапазоні зміни навантаження, наприклад, електропривод потужних компресорів, насосів, ескалаторів і інших механізмів.

Машину називають синхронною через те, що її обертальна частина – ротор обертається з тією ж швидкістю, що і обертальний магнітний потік утворений струмом в обмотці статора, тобто ротор і магнітний потік статора обертаються синхронно.

Асинхронні машини використовуються на практиці головним чином в якості двигунів. Сама назва асинхронний, тобто несинхронний, каже про те, що швидкість обертальної частини двигуна – ротора відрізняється від швидкості обертання магнітного поля, яке створюється обмотками, розташованими у пазах нерухомої частини двигуна – статора. Зі зміною навантаження частота обертання ротора (вала двигуна) може змінюватися на відміну від синхронних машин.

Обмотки статора і ротора асинхронних машин між собою електрично не зв'язані; між ними існує тільки магнітний (трансформаторний) зв'язок, який ще називається індуктивним, що дало привід називати асинхронні машини індуктивними. Проте ця назва не прижилася і в теперішній час практично не використовується.

В сучасній електромеханіці асинхронні двигуни є найбільш розповсюдженими електричними машинами. Вони споживають біля 50% електричної енергії, що виробляється електростанціями країни. Використання асинхронних двигунів безперервно зростає. Таке широке розповсюдження двигуни одержали завдяки конструктивній простоті, низькій вартості і високій експлуатаційній надійності при мінімальних затратах при їх обслуговуванні. Через це немає такої галузі промислового виробництва де б не використовувалися асинхронні двигуни. Широкий діапазон потужностей, на які випускаються ці двигуни, - від часток вата до десятків тисяч кіловат. Вони мають відносно високий ККД: при

потужностях більше 1 кВт він складає 0,7 – 0,95 і тільки у мікро двигунах знижується до 0,2 – 0,65.

Асинхронні двигуни виготовляються для роботи від однофазних, двофазних і трифазних мереж змінного струму.

Однофазні двигуни.

Однофазні двигуни в теперішній час виконуються головним чином як малопотужні машини до 0,6 кВт.

Статор їх має однофазну обмотку, яку зазвичай отримують із трифазної, з'єднаної зіркою, при використанні тільки двох її фаз. Ротор оздоблений короткозамкненою обмоткою у вигляді білячої клітки.

Якщо обмотка статора живиться однофазним змінним струмом, то вона утворить змінну (пульсуючу) намагнічуючу силу. В нерухомому роторі у машині виникне при цьому змінне (пульсуюче) поле. Воно буде наводити в обмотці ротора струми аналогічно як у вторинній обмотці трансформатора.

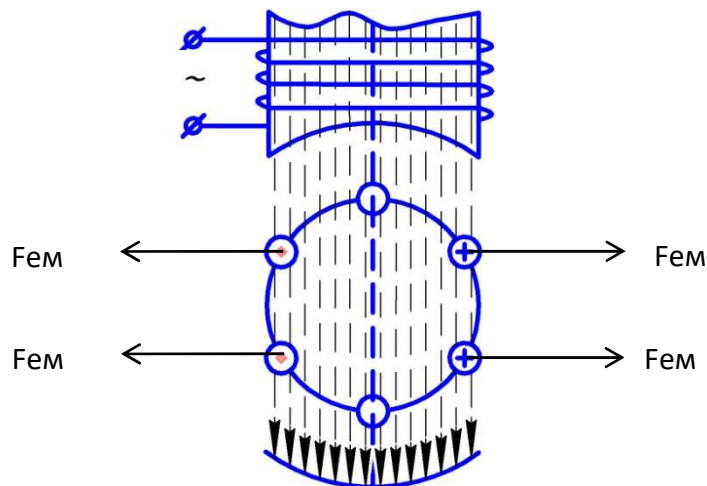


Рис. 7.17. Струми в провідниках роторної обмотки однофазного двигуна при нерухомому роторі

На рис. 7.17. показані напрямки струмів у провідниках короткозамкненого ротора при наявності пульсуючого поля. Очевидно, результативний момент, що діє на ротор, буде дорівнювати нулю, так як електромагнітні сили F_{em} від взаємодії поля і струмів в обмотці ротора на її правій і лівій половинках будуть рівні за величиною і протилежні за напрямком.

Відсутність початкового обертового моменту є характерною ознакою однофазного двигуна за указанною схемою з'єднання. Проте, якщо за допомогою сторонньої сили розкрутити ротор, то двигун в подальшому буде обертатися самостійно і може бути навантаженим.

Потрібно також знати, що подібні явища можна спостерігати і у трифазного двигуна у разі втрати однієї із трьох фаз. Це може статись

через обрив одного із проводів, що живлять обмотки двигуна, наприклад, при перегоранні плавкої вставки запобіжника.

Якщо провід обірваний у нерухомого двигуна, то він при запуску у хід не буде утворювати обертальний момент і не зрушиться з місця. Якщо ж провід обірваний у трифазного двигуна, що обертається, то останній буде продовжувати працювати як однофазний. Але у такому режимі двигун може розвивати потужність лише наполовину.

Режим роботи трифазного двигуна в якості однофазного не може бути допущеним при потужності на його валу, близько до номінальної, так як його обмотки через збільшення у них струмів швидко надмірно нагріються, ізоляція проводів зруйнується (згорить) і двигун вийде з ладу.

Запуск у хід однофазного двигуна зазвичай здійснюється за наявності на статорі допоміжної фази. Вона є обмоткою, яку розташовують у пазах статора таким чином, щоб її намагнічувальна сила була просторово зсунута на 90° ел. градусів відносно намагнічу вальної сили головної обмотки статора. Струм у допоміжній обмотці повинен бути зсунутий по фазі по відношенню до струму основної обмотки. Якщо створені вказані умови, то обидві обмотки будуть збуджувати обертальне магнітне поле. Це поле буде несиметричним, але утворений ним момент у випадку невеликого гальмівного моменту на валу буде достатнім для запуску двигуна у хід.

Допоміжна обмотка вимикається коли двигун досягає приблизно номінальної швидкості обертання, так як вона розраховується на короткочасне навантаження.

Отже, в режимі запуску у хід двигун працює як двофазний (у мережу вмикається дві обмотки), а за номінальною швидкістю обертання – як однофазний.

Для одержання струму у допоміжній обмотці, зсунутого по фазі відносно струму в головній обмотці, послідовно з першою вмикають активний опір (рис. 7.18,а) або ємність (рис. 7.18,б). Використання ємності дозволяє здійснити зсув по фазі між указаними струмами рівно на 90° , що дає можливість значно збільшити початковий обертальний момент.

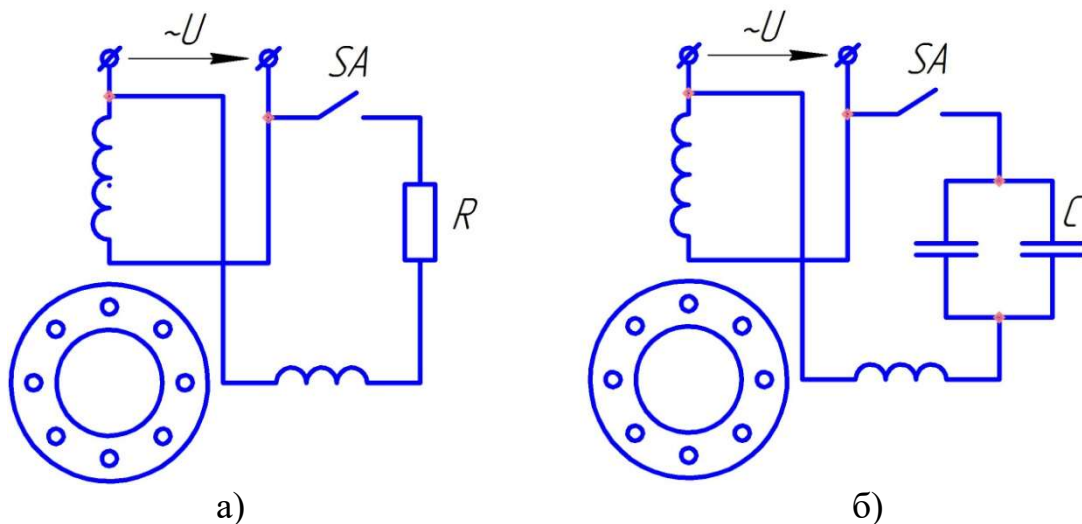


Рис.7.18. Схеми запуску у хід однофазних двигунів

Разом з тим одержали розповсюдження, особливо в побутовій техніці, однофазні двигуни, у яких допоміжна фаза і з'єднана з нею ємність залишаються ввімкненими на весь час роботи двигуна. Такі конденсаторні двигуни за зрівнянням із звичайними однофазними, що працюють з вимкненою допоміжною фазою, мають більший максимальний момент і кращі ККД і $\cos \varphi$.

Двофазні або виконавчі двигуни.

Для здійснення автоматичного управління, регулювання або контролю в багатьох технологічних процесах та вимірюваннях потрібне перетворення «електричного сигналу» в механічне обертання вживають виконавчі двигуни – асинхронні двигуни з двома обмотками на статорі і короткозамкненим ротором. Обмотки в пазах статора розташовуються так само, як і в однофазному двигуні, що має головну і допоміжну обмотки.

Звичайні схеми вмикання асинхронних виконавчих двигунів приведені на рис.5.19. Тут одна з фаз статора називається обмоткою збудження ($O_{зб}$), а друга фаза – обмоткою управління (O_y). Такі схеми дозволяють пускати в хід і зупиняти двигун, регулювати його швидкість обертання шляхом зміни величини напруги U_y на обмотці управління; при цьому обмотка збудження залишається ввімкненою до мережі живлення в робочому режимі двигуна.

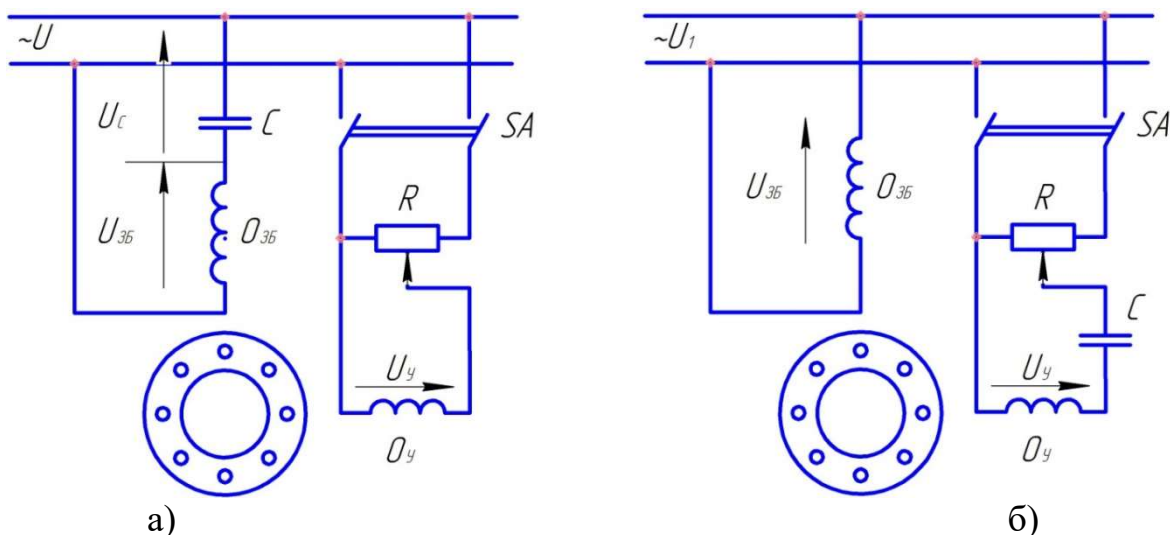


Рис. 7.19. Схеми вмикання асинхронних виконавчих двигунів:
а) амплітудно-фазове керування; б) фазове керування

На рис. 7.19. а) приведена схема за амплітудно-фазовим способом управління із конденсатором у колі збудження. Обмотку управління O_y вмикають до мережі змінного струму через активний регулятор напруги R , напруга управління U_y співпадає по фазі з напругою мережі U . Зсув по фазі струму, а відповідно, і напруги на обмотці збудження по відношенню до обмотки управління здійснюється конденсатором C , який вмикається послідовно із обмоткою збудження. Управління двигуном здійснюється за рахунок зміни амплітуди напруги управління.

На рис. 7.19. б) приведена схема за фазовим способом управління. Обмотку збудження O_{36} вмикають до мережі змінного струму з номінальною напругою U_1 .

На обмотку управління O_y подається напруга, номінальна за значенням і змінна за фазою відносно напруги збудження (за рахунок ланцюга RC).

Управління кутовою швидкістю ротора здійснюється зміною фази напруги управління.

Найбільшим попитом на виробництві користуються трифазні асинхронні двигуни, які складають основу сучасного силового електроприводу. Їх кількість на промислових підприємствах досягає десятків і сотень штук.

Цілком зрозуміло, що в процесі експлуатації такої кількості електричних агрегатів за відповідних обставин виникають аварійні ситуації визвані як електричними, так і механічними причинами. Аварії електродвигунів, особливо великих потужностей, можуть привести до небезпечних наслідків. Особливо це відноситься до хімічних виробництв, нафтогазових, вугільнодобувних і багатьох інших.

Отже, для працівників, що здійснюють контроль та нагляд за протипожежним та технічним станом електроустановок трифазні асинхронні двигуни являють особливу зацікавленість. Досконале знання їх будови і технічних характеристик допоможе більш ґрунтовно виявляти порушення технічних та протипожежних норм і правил в реальних установках під час їх пожежно-технічних обстежень.

Переходимо до докладного вивчення трифазних асинхронних двигунів.

7.4.3. Трифазні асинхронні електричні двигуни

7.4.3.1. Конструктивні особливості

Асинхронний трифазний електродвигун у розібраному вигляді приведений на рис. 7.20; він складається з наступних основних частин: нерухомої частини – статора, обертової частини – ротора і двох підшипникових щитів, в яких розміщуються кінці вала ротора. В чавунний або алюмінієвий корпус статора (станину) запресовується кільцеподібне осердя, зібране із сталевих листів (рис. 7.21), товщиною 0,5 мм, ізольованих один від одного прошарком лаку або окалиною. Із таких самих сталевих штампованих листів збирають ротор. Осердя статора і ротора слугують магнітопроводом для магнітних потоків, що утворюються обмотками статора і ротора, які розташовуються в пазах, виштампуваних в осердях.

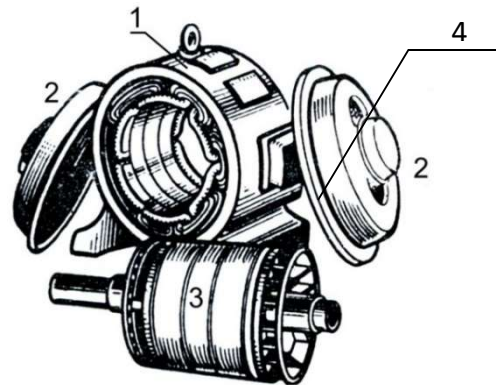


Рис. 7.20. Асинхронний двигун з коротко замкнутим ротором:
1 – статор; 2 – підшипникові щити; 3 – ротор; 4 – розподільна коробка

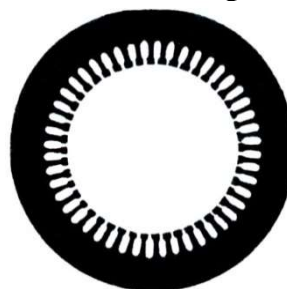


Рис. 7.21. Стальний листок магнітопроводу статора

Обмотки роторів асинхронних двигунів невеликої потужності, за деяким винятком, виконують короткозамкненими, а середньої і великої потужності з трифазною обмоткою із ізольованих проводів так само, як і обмотка статора.

Короткозамкнений ротор з обмоткою у вигляді «білячого колеса» показаний на рис. 7.22, 1 і 2. Мідні або алюмінієві стержні «білячого колеса» закладаються в пази ротора і накоротко замикаються двома мідними (алюмінієвими) торцевими кільцями (рис. 5.26,1)

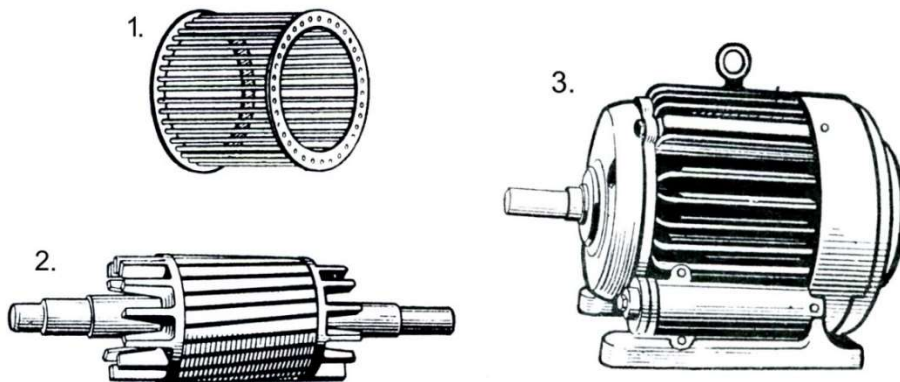


Рис. 7.22. Електродвигун з короткозамкненим ротором:
1 – біляче колесо ротора; 2 – короткозамкнений ротор;
3 – загальний вигляд

В останніх серіях асинхронних двигунів «біляче колесо» ротора виконується із алюмінію, шляхом заливки пазів ротора розплавленим алюмінієм (рис. 7.22, 2). Як видно із рисунка на торцях ротора відлиті також вентиляційні лопатки.

На рис. 7.22, 3 показаний загальний вигляд промислового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором серії АО.

В асинхронних двигунах, із фазним ротором і контактними кільцями, у пазах укладається трифазна обмотка аналогічно до обмотки статора рис. 7.23, 1.

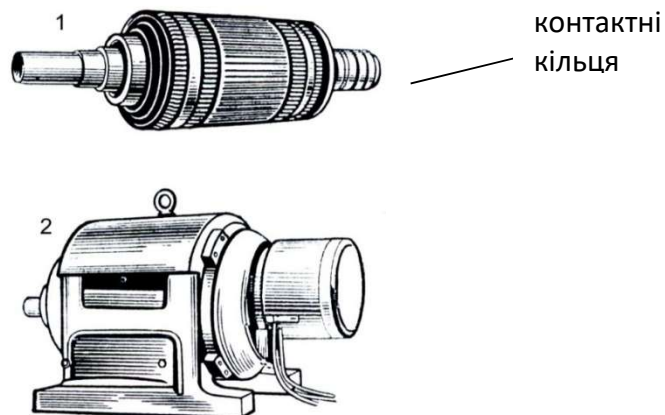


Рис. 7.23. Електродвигун з фазним ротором:
1 – ротор з контактними кільцями; 2 – загальний вигляд

Обмотку з'єднують зіркою, а три її виводи приєднують до контактних кілець, розташованих на валу машини. Кільця ізольовані одне від одного та від вала машини, до них через нерухомі щітки та ковзний контакт приєднують пусковий чи регулювальний реостат як це показано на рис.7.24.

Вал ротора обертається у підшипниках, закріплених у підшипникових щитах.

Підшипникові щити прикріплюються болтами до корпусу статора. У корпус запресовують осердя статора.

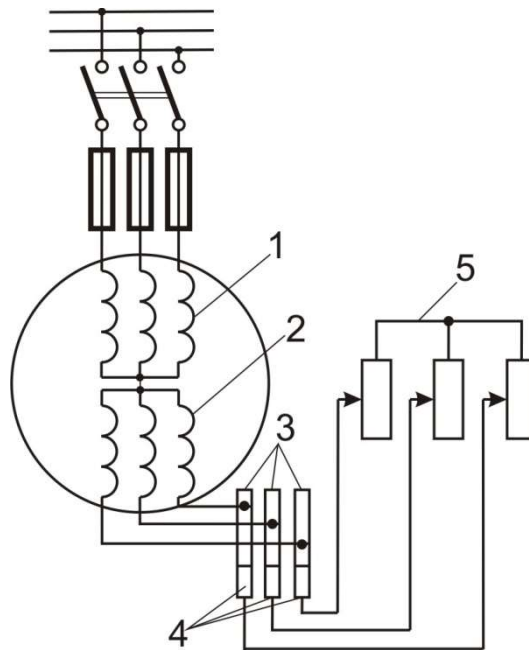


Рис. 7.24. Схема асинхронного двигуна з контактними кільцями, з'єданого з пусковим реостатом:
1 – обмотка статора; 2 – обмотка ротора; 3 – контактні кільця;
4 – щітки; 5 – реостат

В асинхронних двигунах зазор між статором і ротором вибирають якомога меншим, але таким, щоб ротор при обертанні не торкався статора. В машинах невеликої та середньої потужності зазор становить частки міліметра, а у більш потужних машин – міліметри. Із зменшенням зазору знижується намагнічувальний струм, який споживається з мережі, що сприяє підвищенню $\cos \varphi$ двигуна.

7.4.3.2. *Склад статора трифазних асинхронних двигунів та утворення обертого магнітного поля*

Статор трифазної асинхронної машини (рис. 7.25), як уже відмічалось, складається із станини, магнітопроводу та з розташованої в його пазах трифазної обмотки.

Найпростіша трифазна обмотка статора дво полюсної машини має три котушки AX, BY, CZ (рис. 7.25). Кожна котушка статора виконується у вигляді секції із ізолюваного обмоточного проводу, раніше заготовленої із відповідної кількості витків і укладеної в пази осердя магнітопроводу. Кожна котушка виконує роль фази обмотки.

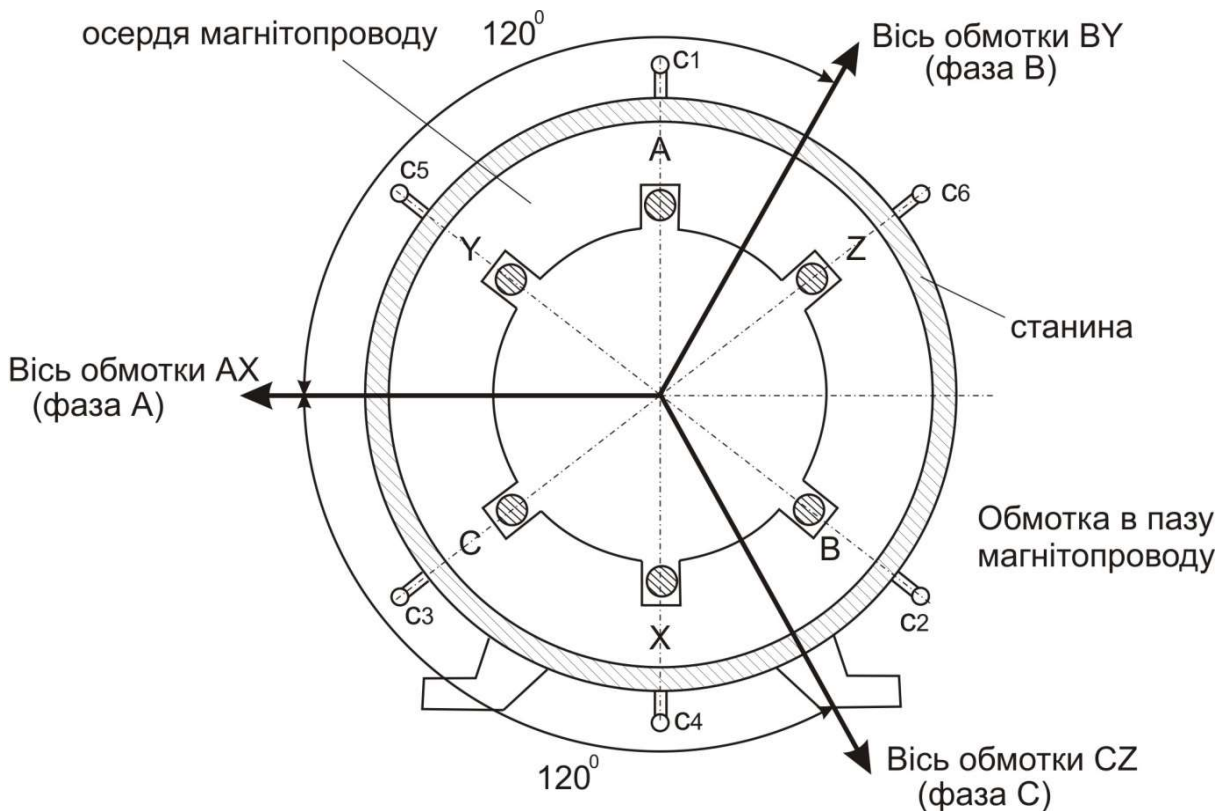


Рис. 7.25. Статор трифазної асинхронної машини

Шість кінців трифазної обмотки статора виводяться назовні і кріпляться до контактних затискачів розподільної коробки на корпусі електродвигуна і споряджаються маркірованими кабельними наконечниками: фаза A – (C₁ - C₄); фаза B – (C₂ - C₅); фаза C – (C₃ - C₆).

Фази обмотки статора з'єднують або трикутником, або зіркою (рис. 7.26). Ці з'єднання можуть бути зробленими всередині машини при її виготовленні. В такому разі двигун має три зовнішні виведення і він може працювати тільки при одній номінальній напрузі. Якщо з'єднання всередині машини не зроблені, то двигун має шість зовнішніх виведень. Це

дозволяє в залежності від величини лінійної напруги мережі живлення з'єднувати фази обмотки статора як зіркою, так і трикутником.

Якщо у паспорті двигуна вказана позначка: Δ / Y – 220/380 В, то це показує, що при напрузі мережі 220В обмотки з'єднуються трикутником, а при напрузі мережі 380В – зіркою. В обох випадках напруга на фазах обмотки статора буде однаковою 220В.

Як видно із рис. 7.25, обмотка статора складається із трьох котушок. Сторони цих котушок укладені в діаметрально протилежні пази внутрішньої поверхні осердя. Кожна з них виконана у вигляді одного витка і позначена двома літерами: А – Х, В – У, С – Z. Буквами А, В, С позначається початок, а буквами Х, У, Z – кінці котушок, зсунутих у просторі одна відносно до другої на 120° .

Графіки зміни миттєвих значень струмів i_A , i_B та i_C в котушках А – Х, В – У, С – Z наведені на рис. 7.27.

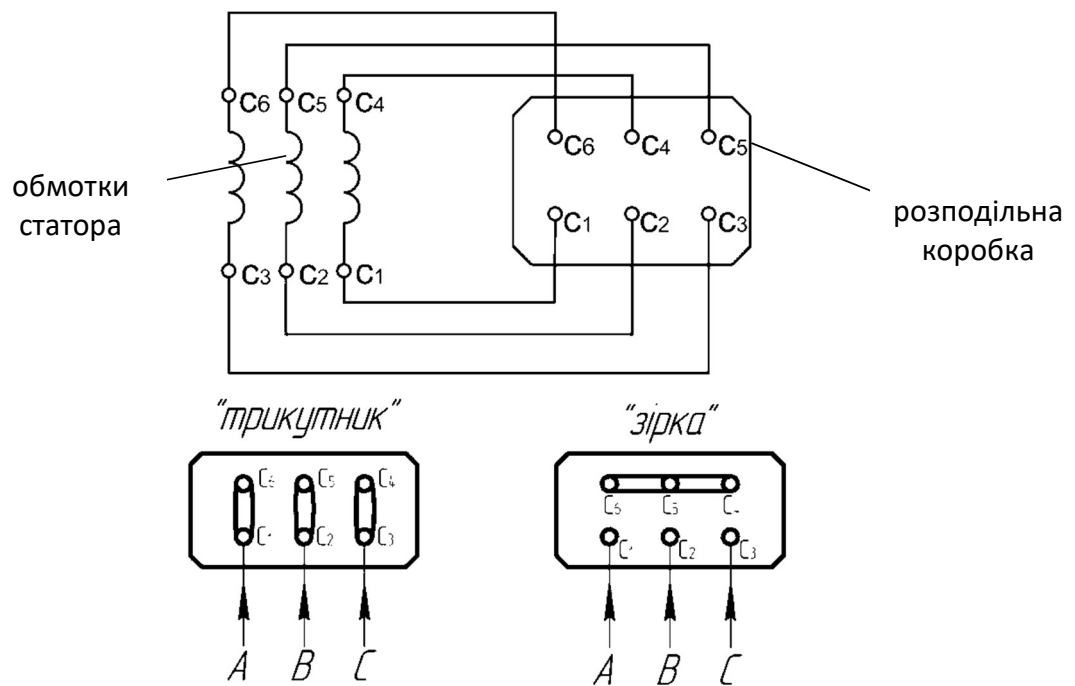


Рис. 7.26. Розподільна коробка асинхронного двигуна

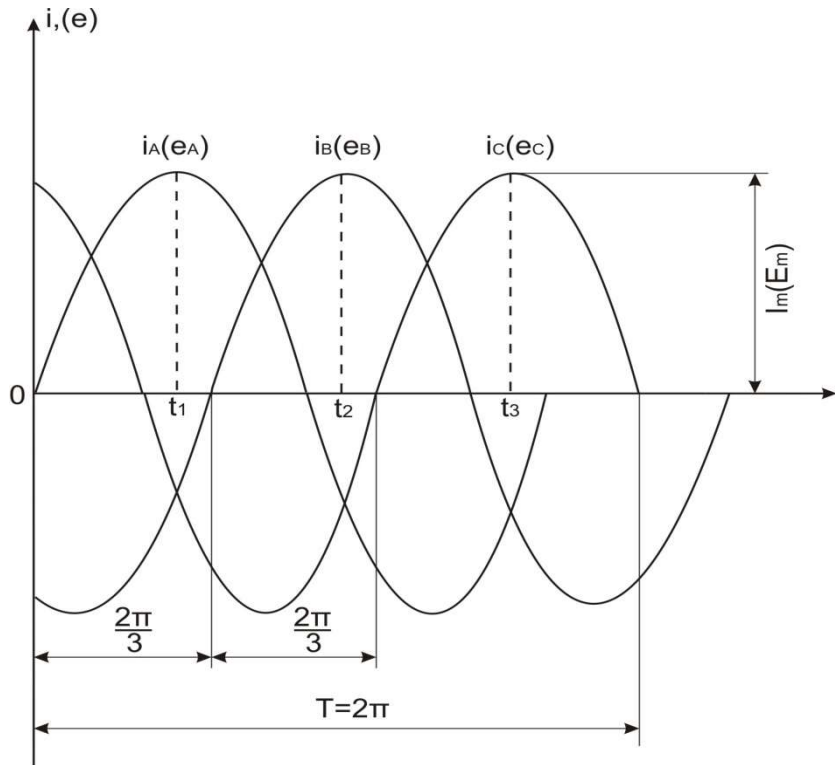


Рис. 7.27. Графіки миттєвих значень струмів (ЕРС) симетричної трифазної системи

Умовимося рахувати струм в будь-якій котушці додатнім, коли він має напрям від її початку до кінця, і від'ємним – при зворотному напрямі. Кожна котушка зі струмом утворює змінне магнітне поле. Три змінних магнітних поля складаючись, утворюють результативне магнітне поле. Картина результативного поля безперервно змінюється, але його можна побудувати для будь-яких миттєвих значень часу.

Побудуємо картину результативного поля для моменту часу t_1 (див. рис. 7.27), коли струм у котушці АХ додатній і максимальний. Напрямок струму в сторонах котушки А – Х умовно показано в перерізі витка на рис. 7.28, 1 знаками перехрестя і точки. Із графіків струмів можна зробити висновок, що в момент часу t_1 струми в котушках ВУ і СZ від'ємні, тобто вони мають напрям від кінців котушок до їх початків (у фазі В від затискача У до затискача В, у фазі С – від Z до С).

Знаючи напрям струмів у фазах котушок, можна побудувати приблизну картину результативного поля. Для цього слід окреслити замкненими лініями групи провідників з однаковими напрямками струму. Користуючись відомим правилом буравчика, відмітимо стрілками умовно додатній напрямок ліній поля.

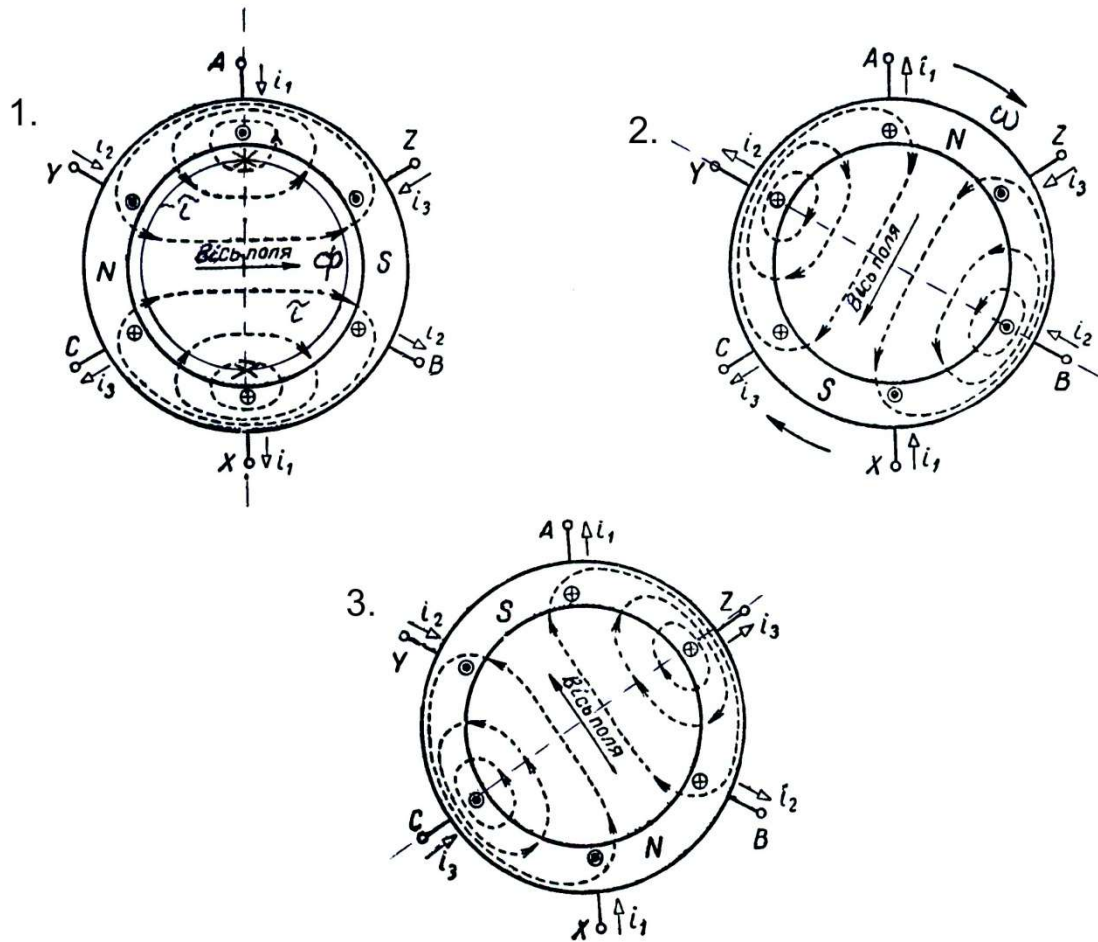


Рис. 7.28. Умовне зображення дво полюсного обертального магнітного поля

Дивлячись в побудовану картину поля, ми бачимо, що в лівій половині осердя магнітні лінії мають напрямок із сталі в повітря, а в правій половині вони направлені із повітря в сталь. Ту частину поверхні осердя, де лінії магнітного поля мають напрямок із сталі в повітря, називають північним полюсом **N**, а ту частину, де вони мають протилежний напрямок, – південним **S**. Вісь полюсів (або вісь магнітного поля) займає у вибраній нами момент часу t_1 горизонтальне положення.

Отже, три просторово зміщених котушок зі струмами, зсунутими в часі одна відносно другої на $1/3$ періоду утворюють дво полюсне магнітне поле.

Тепер, вибираємо друге миттєве значення часу t_2 , коли струм у другій котушці (фазі **B**) буде додатнім і максимальним, рис. 7.27, а струми в першій і третій котушках будуть від’ємними. Шляхом тих самих міркувань можна побудувати приблизну картину поля. Вона показана на рис. 7.28, 2. Із неї видно, що вісь магнітного потоку займає нове положення

у просторі. Накінець, якщо побудувати картину поля для моменту часу t_3 (рис. 7.27, 3), коли струм у третій котушці (фаза С) буде додатнім і максимальним, то легко встановити, що положення магнітного потоку в просторі знову буде іншим і зсунутим у просторі відносно попереднього на $1/3$ періоду або 120° . Картини результативного поля, побудовані на рис. 7.28 для різних моментів часу, показують, що магнітний потік зі зміною струмів у котушках безперервно обертається в напрямку руху стрілки годинника (за напрямом чергування фаз A, B, C).

За потребою зміни напрямку обертання поля (реверсування) слід змінити порядок чергування фаз. На практиці це відбувається шляхом зміни місцями двох проводів на затискачах щитка напруги живлення.

Особливості обертального магнітного поля:

1. Поле еквівалентне полю, що виникає при обертанні дипольного магніту з полюсами N і S, а через це внутрішню поверхню статора можна подати як складову із двох полюсних поділок τ (рис. 7.28, 1)

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

де D – внутрішній діаметр статора;

$2p$ – кількість полюсів.

2. За один період струму поле здійснює один оберт на довжину 2τ .

За $1c$ поле здійснює f_1 обертів, тобто частота обертання поля

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}, \text{ об/хв, або } \omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}, \text{ рад/с,} \quad (7.42)$$

де p – кількість пар полюсів, що утворює обмотка статора, внаслідок з'єднань котушок обмотки певним чином;

f – частота мережі живлення, Гц.

3. Обертання поля проходить за напрямом чергування фаз в обмотках від котушки А-Х до котушок В-У і С-З – пряме чергування ($A \rightarrow B \rightarrow C$).

Змінюючи кількість полюсів $2p$ обмотки статора машини, можна отримати різні частоти обертання магнітного поля. У багатополісній машині за один період зміни струму магнітне поле проходить одну пару полюсів, тобто обертається у просторі на кут $360^\circ/p$, який відповідає одній парі полюсів. Тому при розгляданні електромагнітних процесів в електричних машинах вводять поняття „електричні градуси”, з якими оперують при побудові векторних діаграм, проектуванні обмоток тощо. При цьому 360 просторовим градусам відповідає $360p$ електричних

градусів, тобто електричні градуси мають зв'язок з геометричними градусами у вигляді співвідношення $\alpha_{ел.} = p\alpha_{геом.}$.

Таким чином, при частоті струму мережі $f_1 = 50 Гц$ синхронна частота обертання поля може набувати тільки певного дискретного значення залежно від кількості пар полюсів p , тобто від конструкції обмотки. Синхронна швидкість у двигунів з багатополусною обмоткою наведена в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1.

Синхронна частота обертання магнітного поля статора

кількість полюсів, N	2	4	6	8
кількість пар полюсів, p	1	2	3	4
n_0 , об/хв	3000	1500	1000	150
ω_0 , рад/с	314	157	104,6	78,5

Асинхронна швидкість обертання ротора n – величина змінна. Вона залежить від механічного навантаження на валу двигуна. Чим більше механічне навантаження, тобто чим більше гальмівний момент, створений робочою машиною, яку приводить в дію двигун, тим менша швидкість обертання ротора порівняно з відповідною синхронною швидкістю магнітного поля статора.

7.4.3.3. Електромагнітні процеси і основні характеристики асинхронного двигуна

При підключенні асинхронного двигуна до мережі в обмотках статора починає протікати струм, що створює магнітний потік, тобто обмотка статора відіграє роль обмотки збудження магнітного поля. Магнітне поле передає енергію в обмотку ротора, яка в свою чергу перетворює основну частину електроенергії у механічну роботу за винятком втрат в самій обмотці.

На рис. 7.29 зображена конструктивна схема двополусного трифазного асинхронного двигуна і взаємодія обертового магнітного поля з обмотками статора і ротора.

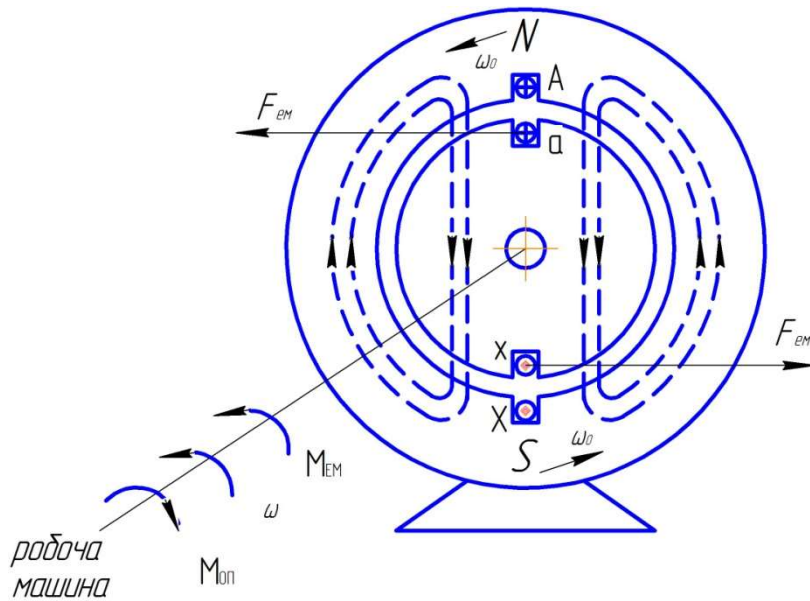


Рис. 7.29. Взаємодія обертального магнітного поля з обмотками статора і ротора

На статорі виділені витки обмотки фази А–Х, а на роторі – а–х. Після підмикання обмотки статора до мережі живлення виникає магнітний потік Φ , що обертається з круговою частотою ω_0 і замикається через статор, повітряний зазор і ротор (пунктирні лінії на рис. 7.29).

Індукція поля розподіляється по колу повітряного зазору за синусоїдальним законом. Потік перетинає провідники та індукує в них ЕРС (індукована дія поля): в обмотці статора – ЕРС самоіндукції, в обмотці ротора – ЕРС взаємоіндукції.

На рис. 7.29 зображений згідно з правилом правої руки напрямок ЕРС, що індукується у провідниках А–Х і а–х (перехрестя та точки).

Основний магнітний потік Φ , що обертається з частотою ω_0 , за законом електромагнітної індукції, наводить у нерухомій обмотці статора ЕРС.

$$E_{1\text{ст}} = 4,44f_1w_1K_{\text{об}1}\Phi, \quad (7.43)$$

а в нерухомому роторі:

$$E_{2\text{рот}} = 4,44f_1w_2K_{\text{об}2}\Phi, \quad (7.44)$$

де w_1 і w_2 – кількість витків відповідно обмоток статора і ротора;

$K_{\text{об}1}$ і $K_{\text{об}2}$ – обмоткові коефіцієнти статора і ротора відповідно.

Вони залежать від типу обмотки і не перевищують значення $\approx 0,3$.

ЕРС $E_{2\text{рот}}$ можна виміряти вольтметром як напругу між розімкненими кільцями ротора при наявності трифазної напруги в обмотках статора.

Якщо коло обмоток ротора замкнено через пусковий реостат (а в короткозамкненому роторі воно завжди є замкненим за допомогою торцевих кілець), в обмотках ротора виникає змінний струм ротора $I_{2\text{рот}}$,

який збігається за напрямом з ЕРС $E_{2\text{рот}}$. На провідники зі струмом $I_{2\text{рот}}$ в магнітному полі діють електромагнітні сили $F_{\text{ем}}$ (механічна дія поля), напряму яких визначається правилом лівої руки (див. рис. 7.29). Сукупність сил всіх провідників ротора створює загальний електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$, його напрям збігається з напрямом обертання магнітного поля. Якщо рушійний електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ більший моменту опору робочої машини $M_{\text{оп}}$, ротор починає обертатися в бік обертання поля з кутовою швидкістю ω . Такий режим роботи асинхронної машини є руховим або двигуновим.

Чим більша частота обертання ротора ω , тим повільніше поле обертається відносно ротора. Відбувається перепад швидкостей обертання магнітного поля статора і ротора $\Delta\omega$.

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega.$$

Відносну різницю частот обертання магнітного поля та ротора називають ковзанням і позначають літерою S .

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \text{ або у відсотках } S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} 100\% \quad (7.45)$$

У перший момент пуску двигуна ротор – нерухомий, $\omega = 0$ і початкове пускове ковзання S_n дорівнює одиниці:

$$S_n \quad S_i = \frac{\omega_0 - 0}{\omega_0} = 1.$$

Зі збільшенням частоти обертання ротора ω ковзання зменшується. Ротор асинхронного двигуна завжди обертається з частотою нижче синхронної, так як по мірі наближення до неї, коли ковзання прямує до нуля, величина наведених ЕРС і струмів зменшується і зменшуються електромагнітні сили взаємодії. При синхронній частоті обертання ротора, що дорівнює частоті обертання поля ω_0 , вони дорівнюють нулю і двигун працювати не буде, він зупиниться. Отже, теоретично ковзання змінюється від 0 до 1, або у відсотках від 0 до 100%. Практично в залежності від номінальної потужності і типів електродвигунів при повному навантаженні ковзання зазвичай знаходиться в межах від 2 до 8% (0,02÷0,08). Менша величина відноситься до більш потужних двигунів. Номінальне значення ковзання приводиться у паспортних даних на асинхронні двигуни та довідниках. Промисловістю випускаються асинхронні двигуни підвищеного ковзання при повному навантаженні ковзання має величину 8-12%.

Якщо відоме значення ковзання, то із формули (7.45) можна одержати частоту обертання ротора:

$$\omega = \omega_0(1-S). \quad (7.46)$$

7.4.3.4. Механічна характеристика трифазного асинхронного двигуна

При визначенні придатності електродвигуна для приведення в дію виробничого механізму необхідно знати його можливості: потужність, яку розвиває двигун, обертальний момент цього двигуна і характер його зміни при зміні навантаження, здатність переборювати короточасні та тривалі перевантаження і ряд інших параметрів.

Для аналізу роботи двигуна велике значення має його механічна характеристика, яка, як уже відомо, є залежністю обертального моменту від ковзання і частоти обертання $M(S, \omega)$, як показано на рис. 7.30.

На рис. 7.34 приведена природна механічна характеристика асинхронного двигуна

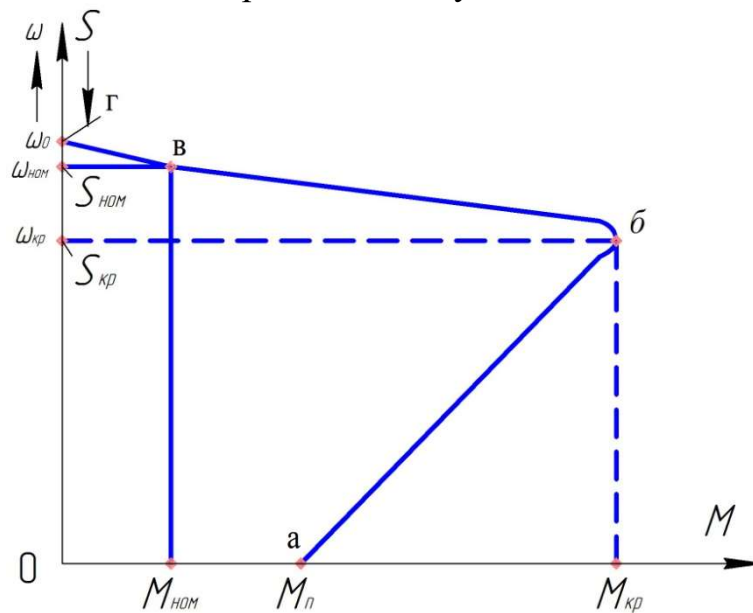


Рис. 7.30. Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна побудована за рівнянням (приводимо його без доведення)

$$M_{CM} = \frac{3U_{1\phi}^2 R'_2}{\omega_0 S [(R_1 + \frac{R'_2}{S})^2 + (X_1 + X'_2)^2]}, \quad (7.47)$$

де $U_{1\phi}$ – фазна напруга на обмотці статора;

R_1 і X_1 – відповідно активний і реактивний опори обмотки статора,

Ом;

R'_2 і X'_2 – приведені значення відповідно активного та реактивного опорів ротора до параметрів обмотки статора, Ом.

Параметри R_1, R'_2, X_1, X'_2 є постійними, оскільки їх значення при зміні навантаження двигуна залишаються практично незмінними. Постійними

величинами також можна вважати напругу на обмотці статора $U_{1\phi}$ та частоту мережі f_1 ($\omega_0 = 2\pi f_1/p$).

Єдиним змінним параметром є ковзання S . Отже, змінюючи ковзання в межах від 1 до 0 і підставляючи у формулу (7.47) через відповідні інтервали, отримаємо природну механічну характеристику $M(\omega, S)$ рис. 7.30.

Кутову швидкість ω розраховуємо за виразом

$$\omega = \omega_0(1-S).$$

Для якісного практичного аналізу рівняння 7.47 знехтуємо в ньому опором обмотки статора R_1 у зв'язку з його незначною величиною $R_1 \ll \frac{R'_2}{S}$, та позначимо $(X_1 + X'_2)$ через X_K , одержимо більш просту формулу для електромагнітного моменту

$$M_{EM} = \frac{3U_{1\phi}^2 \frac{R'_2}{S}}{\omega_0 \left[\left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X_K^2 \right]} \quad (7.48)$$

Якщо асинхронний двигун працює при номінальному навантаженні, тобто при сталому ковзанні ($S = \text{const}$), тоді вираз (5.48) можна записати в такому вигляді

$$M_{EM} = KU_{1\phi}^2, \quad (5.49)$$

$$\text{де } K = \frac{3 \frac{R'_2}{S}}{\omega_0 \left[\left(\frac{R'_2}{S} \right)^2 + X_K^2 \right]}.$$

І як видно із (7.49) електромагнітний момент двигуна прямо пропорційно залежить від квадрата прикладеної напруги. Ця залежність є одним із недоліків асинхронного двигуна так як незначне зниження прикладеної напруги живлення призводить до значного зниження електромагнітного моменту на валу двигуна.

Аналіз наведеного рівняння (7.48) показує, що при двох значеннях ковзання $S = 0$ та $S = \pm \infty$ електромагнітний момент M_{EM} дорівнює нулю. Із цього виходить, що механічна характеристика між цими значеннями ковзання має максимум. Для визначення максимального або критичного значення ковзання $S_{кр}$, що відповідає максимальному (критичному) моменту $M_{кр}$, необхідно взяти першу похідну від M по S та прирівняти її нулю:

$$\frac{dM}{dS} = 0,$$

отримаємо

$$S_{кр} = \frac{R'_2}{X_K}. \quad (7.50)$$

Якщо підставити значення $S_{кр}$ із формули (7.50) у формулу (7.48) одержимо вираз спрощеного значення критичного моменту

$$M_{кр} = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_0 X_K} \quad (7.51)$$

В реальних умовах, при визначенні електромеханічних і механічних властивостей асинхронного електропривода, користуватись рівняннями (7.48) і (7.51) проблематично так як коефіцієнти R_1, R'_2, X_1, X'_2 – невідомі, вони приводяться в спеціальній літературі чи спеціальних довідниках на асинхронні двигуни і інженер не завжди має можливість їх використати. Через це в інженерній практиці розрахунки і побудова характеристик асинхронного двигуна, як правило виконуються за паспортними даними на асинхронні двигуни які є більш доступними в інженерній практиці.

Для цього більш докладно проаналізуємо характерні точки природної механічної характеристики асинхронного двигуна (рис. 7.30).

- точка а – відповідає пусковому моменту $M_{п}$ коли ротор у початковий час пуску під впливом сил інерції залишається нерухомим. В цій точці частота обертання має нульове значення $\omega = \omega_0$, а ковзання дорівнює одиниці $S = 1$.

Якщо у формулу електромагнітного моменту (7.48) підставити $S = 1$ одержимо формулу для визначення пускового моменту асинхронного двигуна $M_{п}$.

$$M_{п} = \frac{3U_{1\phi}^2 R'_2}{\omega_0 [(R'_2)^2 + X_K^2]} \quad (7.52)$$

Відношення пускового моменту до номінального називається відносним коефіцієнтом пуску і позначається $\lambda_{п}$

$$\lambda_{п} = \frac{M_{п}}{M_{ном}}$$

Для двигунів загальнопромислового призначення $\lambda_{п} = (1,2 \div 1,4)$ $M_{ном}$.

- точка б – відповідає критичному (максимальному) значенню моменту $M_{кр}$, що розвиває двигун. Критичному значенню моменту на механічній характеристиці відповідає критичне значення ковзання $S_{кр}$ на вісі ординат. Кутова частота обертання в цій точці буде

$$\omega_{кр} = \omega_0 (1 - S_{кр}).$$

Якщо в процесі роботи асинхронного двигуна статичний момент навантаження через будь-які обставини досягне значення більше критичного, двигун почне гальмувати і перейде на роботу в точку пускового моменту характеристики $M_{п}$ і зупиниться. Це явище називається «перекиданням» моменту, а точка «б» називається точкою перекидання.

Такий режим є аварійним для асинхронного двигуна і якщо апарати захисту своєчасно не знеструмлять двигун, то обмотка статора двигуна вийде з ладу (швидко перегріється і загориться) так як точка а (M_{Π}) є точкою короткого замикання для двигуна і струм який в цей час протікає по проводам обмотки статора досягає 5-7 кратного значення відносно номінального.

Відношення критичного моменту до номінального називається перевантажувальною спроможністю асинхронного двигуна $\lambda_{кр}$

$$\lambda_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}$$

Перевантажувальна спроможність відбиває властивості двигуна витримувати короточасні перевантаження.

Для більшості асинхронних двигунів загально промислової серії $\lambda_{кр} = 1,7 \div 2,2$.

- точка в – є точка перетину двох величин, що характеризують номінальний режим роботи двигуна $M=M_{ном}$ і $S=S_{ном}$, визначає рівновагу моментів навантажувального та двигунного $M_{дв}=M_{нав}$, тобто характеризує усталену роботу двигуна.

- точка г – відповідає кутовій швидкості магнітного поля статора $\omega = \omega_0$ і нульовому значенню ковзання $S = 0$.

Зазвичай, асинхронний двигун працює на ділянці механічної характеристики між точками г і б. Це ділянка стійкої роботи двигуна, а ділянка між точками а і б є ділянкою нестійкої роботи двигуна. При роботі на стійкій ділянці характеристики момент, що розвиває двигун автоматично слідує за зміною моменту навантаження, а при роботі на нестійкій ділянці характеристики цього явища не спостерігається. В разі зміни навантаження порушується рівновага моментів двигуна і статистичного моменту опору, двигун втрачає властивість контролювати частоту обертання і не може забезпечити нормальну (стійку) роботу робочого механізму.

Побудова механічної характеристики за паспортними даними.

Побудова природної механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з достатньою для практики точністю може бути виконана за формулою Клосса, якщо взяти відношення $M_{ем}/M_{кр}$, тобто якщо поділити формулу (7.48) на (7.51), після перетворень одержимо спрощену формулу Клосса.

$$\frac{M}{M_{кр}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}, \text{ або } M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}} \quad (7.53)$$

Спрощена формула Клосса дає достатню точність розрахунків робочої ділянки механічної характеристики в межах зміни ковзання від $S = 0$ до $S = S_{кр}$.

Якщо у формулі (7.53) для номінального моменту $M = M_{ном}$ взяти $M_{кр}/M_{ном} = \lambda_{кр}$, $S = S_{ном}$ і розв'язати рівняння відносно $S_{кр}$, одержимо

$$S_{кр} = S_{ном} (\lambda_{кр} + \sqrt{(\lambda_{кр}^2 - 1)}) \quad (7.54)$$

При визначенні електромеханічних і механічних властивостей асинхронного двигуна в системі електропривода механічна характеристика будуватиметься з використанням формули (7.54) та паспортних даних двигуна:

$$\lambda_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}; \lambda_{п} = \frac{M_{п}}{M_{ном}}; P_{ном}; n_{ном}; U_{ном}; \eta_{ном} i \cos \varphi_n$$

За такими даними дуже просто побудувати механічну характеристику асинхронного двигуна по характерним точкам.

Для практичних цілей номінальний момент двигуна визначається, виходячи із його потужності $P_{ном}$ і швидкості обертання $n_{ном}$. Для цього використовуються наступні співвідношення:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}, Нм \quad (7.55)$$

$$\text{або } M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\frac{2\pi n_{ном}}{60}} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}}, Нм, \quad (7.56)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна, кВт;

$n_{ном}$ – номінальна швидкість обертання двигуна, об/хв;

$\omega_{ном} = 2\pi n_{ном}/60$ – кутова швидкість обертання двигуна, рад/с.

7.4.3.5. Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна

Електромеханічна характеристика являє собою залежність величини струму статора I_1 від ковзання S та кругової частоти обертання ω , $I_1(S, \omega)$.

Спрощений графік зміни струму статора I_1 у двигуновому режимі роботи приведений на рис. 7.31.

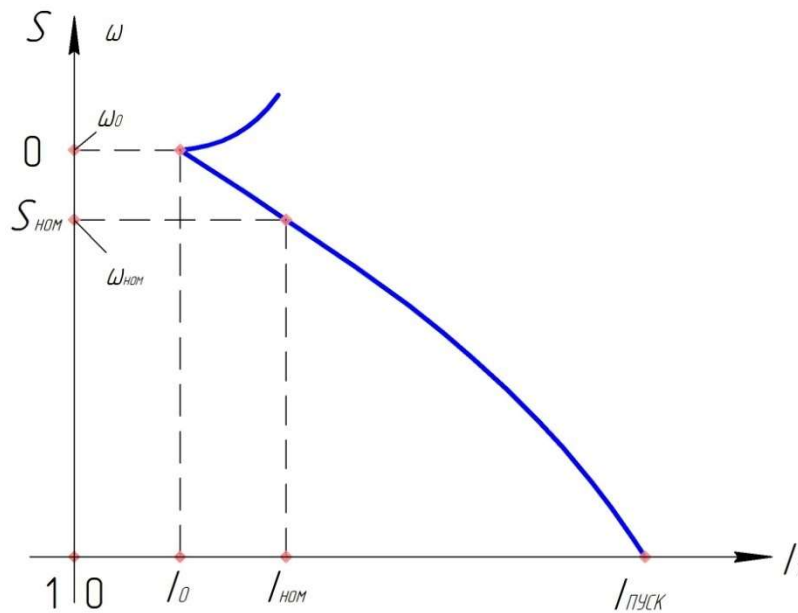


Рис. 7.31. Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна в двигуновому режимі роботи

Як видно із рисунка 7.31 в двигуновому режимі роботи електромеханічна характеристика показує зміну струму в обмотках статора від нуля до усталеного значення $I_{НОМ}$ за час пуску, тобто вона є пусковою характеристикою за струмом. Якщо навантаження на валу двигуна спадає до нуля де ($\omega = \omega_0$), струм статора в цій точці дорівнює нулю і двигун споживає із мережі тільки струм холостого ходу I_0 , який в більшості випадків, при номінальному значенні напруги живлення, складає 50% номінального струму і який витрачається для створення обертового магнітного поля.

Пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що виконується безпосереднім вмиканням обмотки статора на повну напругу мережі живлення, супроводжується великим пусковим струмом, який перевищує в 5–7 разів струм двигуна при номінальному навантаженні.

Так, наприклад, асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю 10 кВт має номінальний струм 20,3 А, пусковий струм $I_{п} = 5I_{н} = 5 \cdot 20,3 = 101,5$ А. (Великі пускові струми є одним із недоліків асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором).

По мірі розгону двигуна струм статора спадає і при досягненні повної швидкості обертання відповідає навантаженню, яке несе двигун (на рис. 7.28 $I = I_{НОМ}$, $\omega = \omega_{НОМ}$, $S = S_{НОМ}$). Процес пуску двигуна протікає дуже швидко, від часток секунди до декількох секунд, за винятком приводів з великими моментами інерції, для яких тривалість пуску може досягати 10–20 с. Оскільки розгін двигуна нетривалий, у ряді випадків пусковий струм є безпечним для нагрівання обмоток двигуна.

Відношення пускового струму до номінального $I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}} = K_i$ називається кратністю пускового струму. Цей параметр є паспортним параметром асинхронного двигуна і має дуже важливе практичне значення, так як він зумовлює вибір типів і параметрів комутаційних апаратів, проводів системи живлення, приладів захисту і таке інше.

Задача 7.5 Паспортні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором:

типорозмір 4А112М4УЗ. $P_{\text{НОМ}} = 5,5$ кВт; $n_{\text{НОМ}} = 1445$ об/хв.; $U_{\text{НОМ}} = 380$ В, $\eta_{\text{НОМ}} = 85,5\%$; $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,85$; $K_i = 7,0$; $\lambda_{\Pi} = 1,2$; $\lambda_{\text{кр}} = 2,2$.

З'єднання обмоток статора зіркою.

Обчислити:

1. Номінальний струм в обмотках статора I_1 ;
2. Пусковий струм двигуна (струм короткого замикання), $I_{\text{пуск}}$, відносний кидок струму $K_i = I_{\text{пуск}}/I_{\text{НОМ}}$;
3. Швидкості обертання магнітного поля статора ω_0 та ротора $\omega_{\text{НОМ}}$;
4. Електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ і номінальний обертовий момент $M_{\text{НОМ}}$, номінальне $S_{\text{НОМ}}$ та критичне $S_{\text{кр}}$ значення ковзань;
5. Пусковий та критичний момент двигуна;
6. Побудувати механічну характеристику двигуна за спрощеною формулою Клосса.

Розв'язання.

1. Номінальний струм в обмотках статора $I_{\text{НОМ}}$

$$I_{1\Phi} = I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,85 \cdot 0,855} = 11,5 \text{ А}.$$

Струм у провідниках мережі живлення (лінійний струм) $I_{\text{л}}$ також буде дорівнювати 11,5 А так як за умовою задачі схема з'єднання обмоток статора – зірка, а в такому разі $I_{1\Phi} = I_{\text{л}}$.

2. Пусковий струм або струм короткого замикання визначається за даними умови задачі. Відома кратність пускового струму $K_i = 7$.

$$K_i = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{НОМ}}}, \text{ або } I_{\text{н}} = I_{\text{НОМ}} \cdot K_i = 11,5 \cdot 7 = 80,5 \text{ А}.$$

3. Визначаємо частоту обертання магнітного поля статора двигуна.

За паспортними даними номінальна швидкість обертання ротора (вала двигуна) $n_{\text{НОМ}} = 1445$ об/хв. Відомо, що частота обертання магнітного поля статора може приймати тільки дискретне значення в залежності від кількості пар полюсів p . При $p = 1$ – 3000 об/хв, при $p = 2$ – 1500 об/хв, що близько по значенню до $n_{\text{НОМ}} = 1445$ об/хв при цьому $S_{\text{НОМ}} = 0,037$ або на 3,7% відрізняється від S_0 , отже, очевидно, що обмотка двигуна утворює дві пари полюсів, тоді

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с,}$$

відповідно

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1445}{60} = 151,2 \text{ рад/с}$$

4. Електромагнітний момент

$$M_{ем} = \frac{P_1}{\omega_{ном}} = \frac{P_{ном}}{\eta \omega_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{0,855 \cdot 151,2} = 42,5 \text{ Нм,}$$

номінальний момент

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{151,2} = 36,4 \text{ Нм,}$$

номінальне ковзання

$$S_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{157 - 151,2}{157} = 0,037,$$

критичне ковзання за рівнянням (5.54)

$$S_{кр} = S_{ном} (\lambda_{кр} + \sqrt{\lambda_{кр}^2 - 1}) = 0,037(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,15,$$

де $\lambda_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}} = 2,2$ – за паспортними даними двигуна.

5. Пусковий момент

$$M_{п} = \lambda_{п} \cdot M_{ном} = 1,2 \cdot 36,4 = 43,7 \text{ Нм,}$$

де $\lambda_{п} = 1,2$ – за паспортними даними двигуна.

Критичне значення моменту

$$M_{кр} = \lambda_{кр} \cdot M_{ном} = 2,2 \cdot 36,4 = 80 \text{ Нм}$$

6. Рівняння механічної характеристики за спрощеною формулою

Клосса

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}} = \frac{2 \cdot 80}{\frac{S}{0,15} + \frac{0,15}{S}} = \frac{160}{\frac{S}{0,15} + \frac{0,15}{S}};$$

В останнє рівняння підставляємо послідовно значення S від нуля до одиниці (через деякі проміжки, які вибираємо довільно з урахуванням значень $S_{ном}$ і $S_{кр}$). Для кожного вибраного значення S розраховуємо значення моменту за спрощеною формулою Клосса. Результати розрахунків зводимо у таблицю. За результатами даних таблиці будемо природну механічну характеристику рис. 7.32

**Результати розрахунків механічної характеристики за
рівнянням Клосса за зміною S від 0 до 1.**

S	0	0,037 ($S_{ном}$)	0,05	0,09	0,1	0,15 ($S_{кр}$)	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
M, Нм	0	37,2	48	70,8	74	80	77	65	57	41	29	27
ω , рад/с	157	151,2	149,15	142,9	141,3	133	126	110	94	63	31,4	0

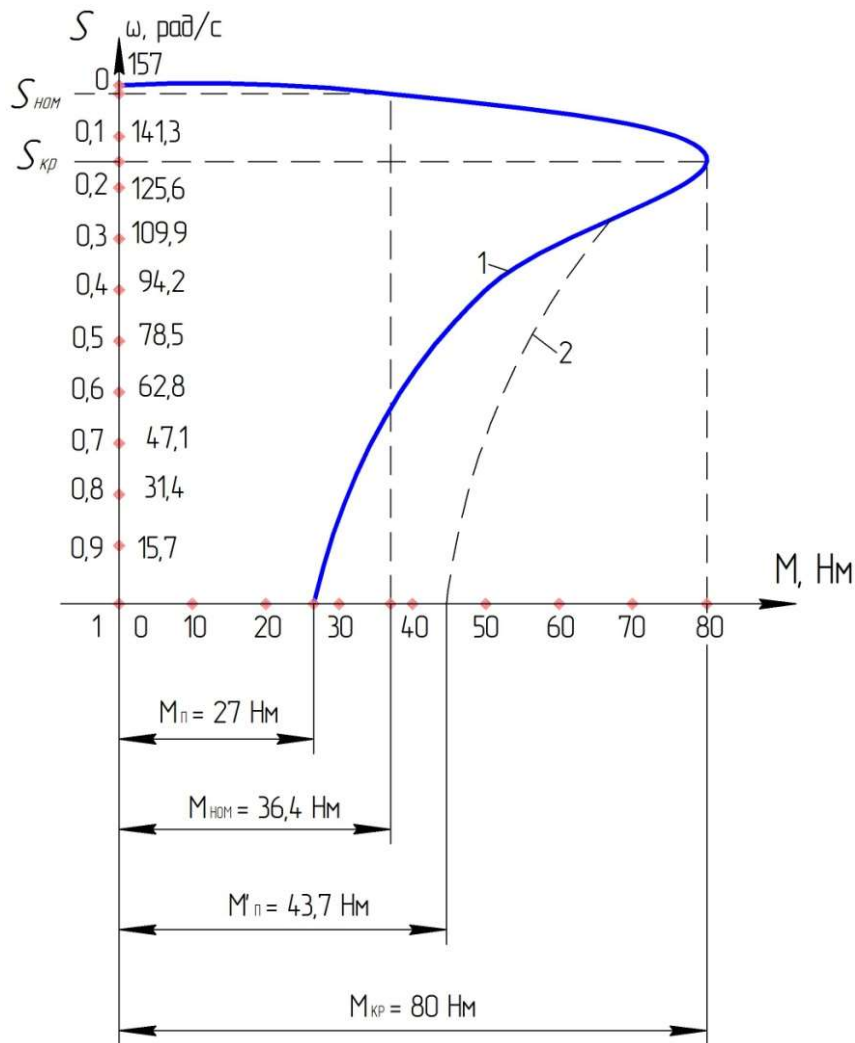


Рис. 7.32. Природна механічна характеристика асинхронного двигуна (до задачі 7.5). На рисунку:

- 1 – характеристика розрахована за спрощеною формулою Клосса;**
- 2 – характеристика побудована по характерним точкам (за паспортними даними)**

Як видно із рисунка 7.32 при ковзаннях $S > 0,4$ і близьких до одиниці (пусковий режим двигуна $M_{п}$) використання спрощеної формули Клосса призводить до великої похибки розрахунку пускового моменту. Тому при

розрахунках пускового моменту двигуна ($S = 1$) доцільно використовувати паспортні дані двигуна з урахуванням значення $\lambda_{\Pi} = \frac{M'_{\Pi}}{M_{ном}}$, тобто $M'_{\Pi} = \lambda_{\Pi} \cdot M_{ном}$.

7.4.3.6. Робота асинхронного двигуна при відхиленнях основних параметрів від номінальних значень

1. Зменшення величини напруги живлення при номінальній частоті. Електромагнітне, критичне та пускове значення моменту асинхронного двигуна (рівняння (7.49), (7.51) і (7.52)) пропорційні напрузі в квадраті спрощено можна записати $M = kU_1^2$, де k – коефіцієнт пропорційності. Цю особливість асинхронних двигунів необхідно враховувати в практичному їх використанні, так як навіть відносно невелике зменшення напруги призводить до зменшення обертального моменту двигуна і порушенню нормального режиму його роботи. Зменшення обертального моменту на валу двигуна, при номінальному статичному навантаженні, призведе до недопустимого збільшення струму в обмотці статора і якщо своєчасно не знеструмити двигун, то він буде нагріватися до непередбаченої температури і може стати причиною виникнення джерела запалювання через надмірне перегрівання обмотки статора, ізоляція обмоточних проводів зруйнується, обвуглиться і, як правило, загориться і призведе до виникнення коротких замикань між окремими фазами, або між фазою та корпусом двигуна зі всіма впливаючими з цього негативними наслідками. У більшості випадків за таких умов обмотка і в цілому двигун виходить із ладу і потребує капітального ремонту.

Отже, виходячи з умови що $M \approx U_1^2$, візьмемо відношення

$$\frac{M}{M_{ном}} = \frac{U_1^2}{U_{ном}^2},$$

одержимо

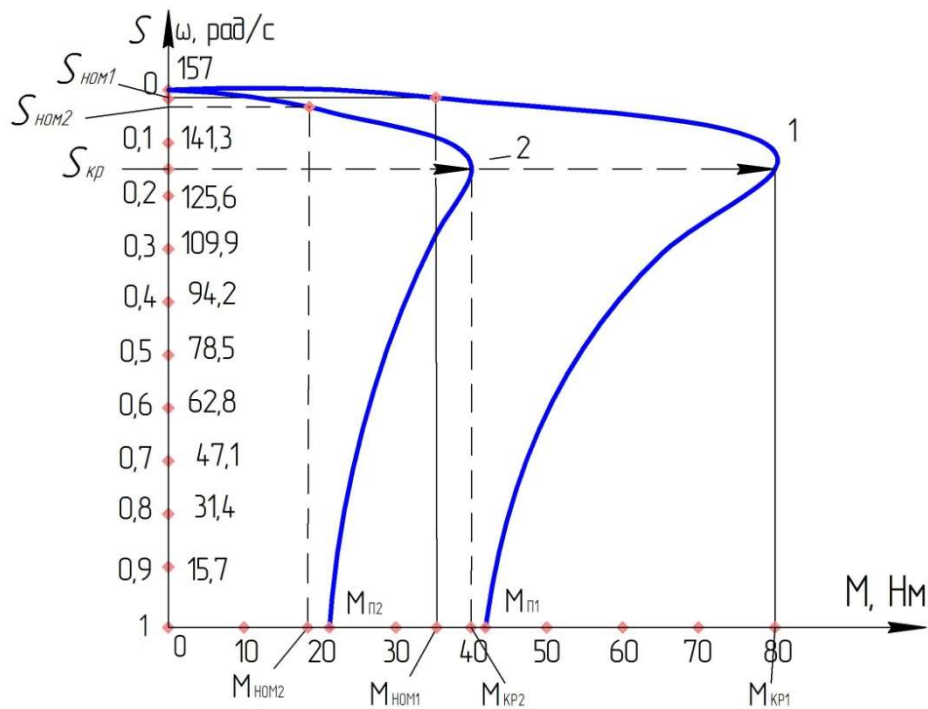
$$M = M_{ном} \frac{U_1^2}{U_{ном}^2}. \quad (7.57)$$

Так, наприклад, якщо підведена напруга U_1 знизилася на 30%, тобто U_1 приймає значення $U_1 = 0,7U_{ном}$, то вираз (5.57) буде мати вигляд:

$$M = M_{ном} \left(\frac{0,7U_{ном}}{U_{ном}} \right)^2 = 0,49M_{ном}. \quad (7.58)$$

Відповідно рівнянню (5.58) механічна характеристика при зниженій напрузі U_1 до рівня $U_1 = 0,7 U_{ном}$ буде масштабувати природну механічну характеристику по вісі моментів в 0,49 разів.

Наприклад, якщо скористатися природною механічною характеристикою, розрахованою за паспортними даними при номінальній напрузі живлення $U = U_{ном}$ до задачі 7.5, то штучна механічна характеристика при зниженій напрузі на 30% від номінального значення буде мати вигляд, показаний на рис. 7.33.



**Рис. 7.33. 1 – природна механічна характеристика асинхронного двигуна за напругою $U = U_{ном}$;
2 – штучна механічна характеристика за напругою $U = 0,7U_{ном}$.**

На рисунку 7.33 характерні точки штучної характеристики відмічені індексом 2 біля основних позначень величин.

$$M_{кр2} = 0,49M_{кр} = 0,49 \cdot 80 = 39,2 \text{ Нм},$$

$$M_{п2} = 0,49M_{п} = 0,49 \cdot 43,7 = 21,4 \text{ Нм},$$

$$M_{ном2} = 0,49M_{ном} = 0,49 \cdot 36,4 = 17,8 \text{ Нм},$$

а також $S_{ном2}, \omega_{ном2}$.

Із рисунку 7.33 видно, що зниження напруги мережі живлення U_1 відносно його номінального значення $U_{ном}$ супроводжуються не тільки зменшенням максимального, пускового та номінального моментів, але й зміною частоти обертання ротора $\omega_{ном2}$. Зі зменшенням напруги мережі частота обертання ротора знижується (ковзання $S_{ном2}$ підвищується).

Зниження напруги U_1 також впливає на величину перевантажувальної спроможності двигуна $\lambda_{кр}$, при зниженні напруги на 30% $\lambda_{кр}$ буде

$$\lambda_{кр2} = 0,49\lambda_{кр} = 0,49 \cdot 2,2 = 1,07,$$

тобто двигун втрачає можливість переборювати короточасні перевантаження вище номінального значення.

Зниження перевантажувальної спроможності треба враховувати при виборі потужності двигуна.

З урахуванням зниження напруги мережі, наприклад, до значення U_{1min} доступний момент який буде розвивати двигун, визначається як $M_{доп}$.

$$M_{доп} = \left(\frac{U_{1min}}{U_{ном}}\right)^2 \lambda_{кр} M_{ном} \quad (7.59)$$

Для асинхронних двигунів загальнопромислового призначення допускається робота з номінальним навантаженням, за зниженням напруги живлення до -5% номінальної величини.

2. Робота асинхронного двигуна за умови підвищення напруги живлення

В асинхронному двигуні через наявність повітряного проміжку між статором і ротором холостого ходу I_0 має підвищене значення. Цей параметр у значній мірі визначається намагнічуючого струму обмотки статора I_M .

З достатньою для практики точністю приймають $I_M=I_0$. Величина I_0 складає значну частку номінального струму $I_{ном}$ двигуна – у середньому від 20 до 60%. Він збільшується у двигунів закритого типу і у двигунів з збільшеним повітряним проміжком (кранові двигуни). При інших рівнозначних умовах відносна величина $I_0/I_{ном}$ тим більша, чим менше номінальне число обертів за хвилину двигуна.

При збільшенні напруги живлення вище номінального значення через насичення сталі двигуна струм холостого ходу асинхронного двигуна лавинно наростає. Так, при напрузі живлення на 10% вище номінального значення струм холостого ходу асинхронного двигуна збільшується приблизно в 1,3 разів, а при напрузі в 20% вище номінального виросте в 1,7 – 1,9 разів, тобто майже вдвічі, і становиться близьким до номінального значення струму двигуна. Таке співвідношення струмів є аварійним і накладає відповідні обмеження на навантаження двигуна.

В каталогах на асинхронні двигуни, наприклад, серії 4АМ, передбачається експлуатація двигунів при відхиленнях напруги живлення в більшу сторону, не більше як на +10% від номінальної величини. Це слід враховувати при експлуатації асинхронних електроприладів в умовах підвищеної напруги мережі живлення.

3. Непередбачений однофазний режим роботи трифазного асинхронного двигуна

На практиці експлуатації приводів з асинхронними трифазними двигунами спостерігаються нерідкі випадки втрати однієї фази мережі живлення. В таких випадках асинхронний трифазний двигун опиняється в неперервному однофазовому режимі. Це часто трапляється при перегорянні плавкої вставки запобіжника однієї із фаз, при обриві одного із фазних проводів та інших випадках. В такому разі трифазний двигун опиняється в режимі однофазного з лінійною напругою двох фаз, що залишилися. При пуску вхід він обертається не буде так як пульсуюче магнітне поле двох фаз не розвиває пускового моменту. У робочому режимі його стан буде залежати від навантаження на валу, тобто від величини струму в обмотках статора.

Якщо порівняти потужності трифазного асинхронного двигуна у трифазному $P_{(3)}$ і однофазному $P_{(1)}$ режимах роботи, а гранично допустимим струмом, що дорівнює номінальному значенню $I_{1ном}$, то одержимо:

$$\frac{P_{(1)}}{P_{(3)}} = \frac{U_{1л} \cos \varphi_{1(1)}}{\sqrt{3} U_{1л} I_{1ном} \cos \varphi_{1(3)}} \approx \frac{1}{2}; \quad P_{(1)} = 0,58 P_{(3)} \quad (7.60)$$

Відношення $\frac{P_{(1)}}{P_{(3)}}$ приймають в меншу сторону до 0.5 з

урахуванням деякого погіршення енергетичних показників асинхронного двигуна в однофазному режимі. З іншої сторони, якщо врахувати, що в однофазному режимі одна з фаз двигуна не обтікається струмом, то, припускаючи наявність в двигуні певного тепловипромінювання і, виходячи із умови рівності електричних втрат потужності в однофазному та трифазному режимах, маємо:

$$2I_{(1)}^2 R_{\phi} = 3I_{(3)}^2 R_{\phi}, \quad (7.61)$$

де R_{ϕ} – активний опір однієї фази асинхронного двигуна.

На підставі (7.61) маємо $I_{(1)} \approx 1,2 I_{(3)}$, тобто силу струму двигуна в однофазному режимі по тепловому навантаженні допустимо збільшувати в 1,2 рази за зрівнянням зі струмом трифазного режима і підвищити потужність двигуна в однофазному режимі до $0,5 \cdot 1,2 = 0,6$ від трифазної потужності з аналізу формули (7.60) впливає, що в непередбаченому однофазному режимі роботи трифазний асинхронний двигун допускає на валу приблизно в 2 рази меншу потужність. Враховуючи, що кратність максимального обертового моменту асинхронного двигуна $M_{кр} / M_{ном}$ в середньому дорівнює двом, $P = M \cdot \omega$ і кутова швидкість асинхронного

двигуна при переході із трифазного режиму в однофазний практично не змінюється, так як визначається кутовою швидкістю магнітного поля статора ($\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$), приходимо до висновків:

якщо навантаження на валу перевищує номінальне, асинхронний двигун зупиниться, він перейде в режим пуску, а струм стане близьким до пускового (режим короткого замикання);

при навантаженні на валу в межах 50-100% номінального двигун буде продовжувати обертатися зі струмом більшим за номінальний. Обмотка статора і в цілому двигун будуть перегріватися і можуть стати джерелом запалювання;

якщо навантаження на валу менше 50% номінального, асинхронний двигун буде продовжувати обертатися і його струм не перевищить номінального значення.

В реальних електроприводах навантаження на валу асинхронних двигунів 60...110% номінального, через це непередбачений однофазний режим трифазного асинхронного двигуна являється аварійним і в більшості випадків призводить до виходу із ладу обмотки статора, вона обуглюється, втрачає ізолюючі властивості, що призводить до коротких замикань між фазами або між фазою і корпусом двигуна. Якщо виникла подібна ситуація двигун потребує капітального ремонту.

4. Передбачений однофазний режим

Коли однофазна мережа живлення, то трифазний асинхронний двигун можна використовувати в передбаченому режимі роботи як однофазний. В такому випадку за режимом він нічим не відрізняється від однофазного асинхронного двигуна, який утримує на статорі помимо робочої обмотки ще й пускову, зсунуту в просторі на 90 ел. град відносно робочої. Потужність однофазних асинхронних двигунів, як правило, не перевищує 3 кВт. Їх ротор короткозамкнений. При великих потужностях використовують трифазні асинхронні двигуни в однофазному вмиканні. На період пуску пускову обмотку однофазного асинхронного двигуна або частину трифазних обмоток, що використовуються в якості пускової, підключають до мережі через фазозсувні елементи у вигляді резистора або конденсатора. Це необхідно для створення фазового зсуву струму в пусковій обмотці відносно струму в робочій. В результаті цього виникає пусковий обертовий момент, який за Законом Ампера можна подати в такому вигляді:

$$M_{\Pi} = k I_{1\text{роб}} I_{1\Pi} \sin \alpha \quad (7.62)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, $\frac{H \cdot m}{A^2}$; $I_{1\text{роб}}$, $I_{1\Pi}$ – відповідно струмами в робочій і пусковій обмотці, А; α кут фазового зсуву між струмами в робочій і пусковій обмотках, ел. град.

Після пуску пускову обмотку або її частину вимикають. Із формули (7.62) виходить, що найбільший кут фазового зсуву, а відповідно і більше значення пускового струму і момента двигуна, забезпечується при виконанні в якості фазового елемента конденсатора. Це відображено на механічних характеристиках однофазного асинхронного двигуна, показаних на рисунку 7.34, б, а на рисунку 7.34, а – приведені основні схеми передбаченого вмикання трифазних асинхронних двигунів напругою 380/220В в однофазну електричну мережу напругою 220В.

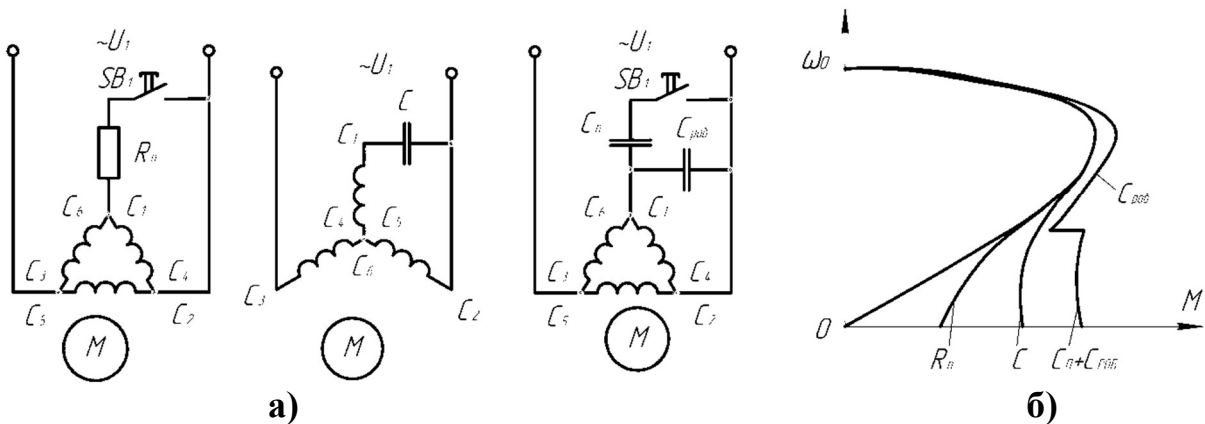


Рис. 7.34. Можливі схеми вмикання трифазних асинхронних двигунів в однофазний режим:

а) з резистивним і конденсаторними елементами; б) їх механічні характеристики

У схемі (7.34, а) з пусковим резистором R_{Π} , величина опору якого визначається за формулою:

$$R_{\Pi} = 1,5 \frac{U_{1ном}}{I_{1\Pi}},$$

де $U_{1ном}$ – номінальна напруга однофазної мережі, В;

$I_{1\Pi}$ - (5..7) $I_{1ном}$ – пусковий струм асинхронного двигуна, А.

В такому випадку потужність асинхронного двигуна в однофазовому режимі по відношенню до трифазового складає $P_{(1)} = (0,5..0,6) P_{(3)}$.

У схемі (рис. 7.34, а) з постійно ввімкнутим конденсатором його питома ємність повинна складати 40мФ/кВт співвідношення потужностей $P_{(1)} = (0,6..0,7) P_{(3)}$.

У схемі (рис. 7.34, а) з пусковою ємністю, що вимикається її ємність $C_{\Pi} \approx 2,5C_{роб}$, а питома ємність робочого конденсатора 50мФ/кВт. Співвідношення потужностей $P_{(1)} = (0,7..0,8) P_{(3)}$.

Конденсатор, що не використовуються – неполярні, наприклад, металеві паперові типу МБГО, МБГ-4, К73П-2 й інші, з номінальною напругою не менше $\sqrt{2}U_{1ном}$. При використанні конденсаторів необхідно за вимогами електробезпеки передбачити їх розряд у вимкненому стані на розрядний опір, так як саморозряд таких конденсаторів незначний і вони на протязі довгого часу зберігають потужний електричний заряд.

7.4.3.7. Основні технічні дані деяких серійних трифазних асинхронних електродвигунів

Промисловість в теперішній час випускає велику різноманітність асинхронних електродвигунів, об'єднаних, як правило, в єдині серії з широким діапазоном номінальних потужностей. Вперше єдина серія була утворена для асинхронних двигунів, оскільки найбільша питома вага у випуску електронних машин займають саме асинхронні машини, конструкція яких відносно проста, а трудомісткість невелика. Про широке використання і значення цих двигунів свідчить те, що останні споживають в теперішній час в державі більше 40% всієї виробленої електричної енергії.

Новітні технології у галузі електроізоляційних матеріалів, обмотувальних проводів, електротехнічних сталей і удосконалення методів розрахунку електричних машин з використанням комп'ютерних техніки привели до того, що єдині серії електричних машин систематично оновлюються. Так наприклад, замість електродвигунів АИ, освоєно випуск двигунів більш досконалих нових серій RA і 6A.

В конструкторському відношенні асинхронні електродвигуни випускаються з короткозамкненим ротором (рис. 7.35) і з фазним ротором (рис. 7.36).

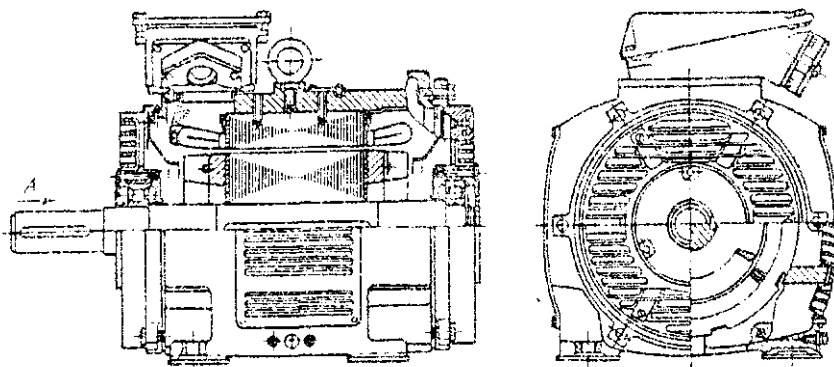


Рис. 7.35. Конструкція асинхронного трифазного електродвигуна з коротко замкненим ротором серії 4A

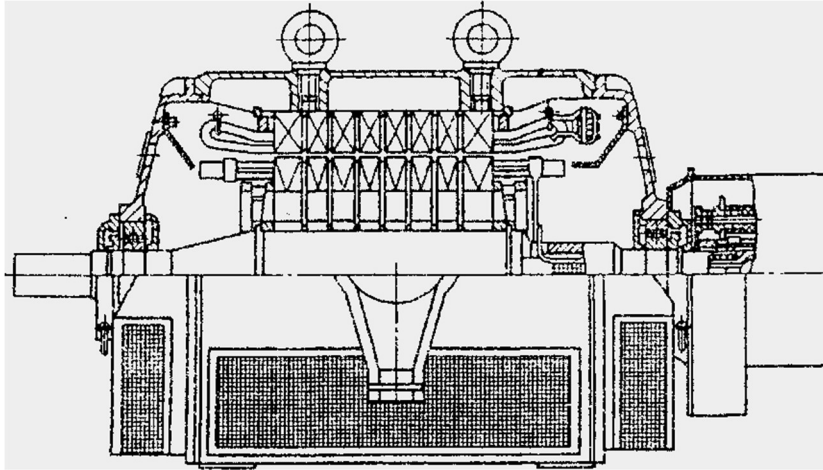


Рис. 7.36. Конструкція асинхронного трифазного електродвигуна з фазним ротором серії 4АК

Асинхронні електродвигуни загального призначення серії 4А випускаються промисловістю потужністю від 0,06 до 400 кВт на напругу до 1000 В. З частотою обертання: 3000, 1500, 750, 600 і 500 об/хв.

Двигуни призначені для роботи від мережі змінного струму, частотою 50 Гц. Вони виготовляються на напругу 380/220 В; 380/660 В.

Двигуни можливо експлуатувати при відхиленнях напруги мережі від номінального значення в межах - 5...+10%.

В серії 4А передбачено три виконання за ступенем захисту:

IP44 для двигунів з висотами вісі обертання 50 - 355 мм (закрите виконання);

IP23 для двигунів з висотами вісі обертання 160-355 мм (захищене виконання);*

IP54 для двигунів спеціалізованих виконань (пилезахищене виконання).

Розрахунковий строк служби двигунів – не менше 15 років при напрацюванні 40 тис. годин. Напрацювання обмотки статора – не менше 20 тис. год., розрахункове напрацювання підшипників – не менше 14 тис. год. Вірогідність безвідказної роботи – не менше 0,9 за 10 тис. год. напрацювання.

Серія 4А в залежності від робочих властивостей і умов роботи двигунів утримує в собі крім основного виконання і модифікації: з підвищеним пусковим моментом; з підвищеним ковзанням; багато швидкісні; з фазовим ротором; із вбудованим електромагнітним гальмом; мало шумні, високоточні, ліфтові й інші.

В цілому двигуни серії 4А призначені для роботи в тривалому режимі роботи S1.

Асинхронні електродвигуни загального призначення серії 4АМ – є результатом модернізації двигунів серії 4А, що дозволило підвищенню деяких основних параметрів, зменшити масу двигуна.

За номінальним значенням параметрів, кліматним фактором навколишнього середовища, умовам експлуатації, транспортуванню і зберіганню асинхронні двигуни серії 4АМ відповідають серії 4А за ступенем захисту IP44.

Номінальний режим роботи асинхронних двигунів серії 4АМ - довготривалий S1.

Асинхронні електродвигуни основного виконання серій А і АІР – є новою, уніфікованою серією двигунів, відповідаючою перспективному рівню розвитку світового електромашинобудування. Вони призначені для потреб промислових підприємств та сільськогосподарського виробництва. З часом вони повинні повністю замінити двигуни серії 4А і 4АМ.

Загальний вигляд асинхронних трифазних електродвигунів серії А і АІР приведений на рис. 7.37.

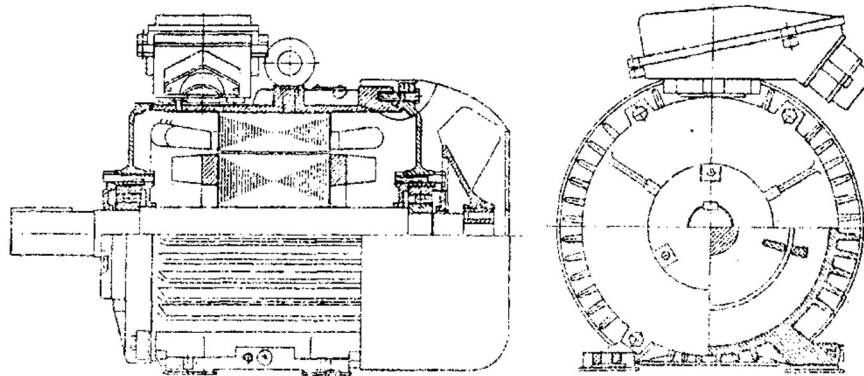


Рис. 7.37. Загальний вигляд асинхронних трифазних електродвигунів серій А і АІР

Асинхронні електродвигуни серії А2, А02 загального призначення мають дев'ять габаритів потужністю в діапазоні від 0,6 до 100 кВт. Двигуни основного виконання призначені для довготривалого режиму роботи S1 від мережі трифазного струму частотою 50 Гц.

Асинхронні двигуни цієї серії зняті з виробництва і замінені більш досконалими двигунами серії 4А, 4АМ і АІ. Але враховуючи, що в теперішній час в експлуатації знаходяться мільйони двигунів серії А2 і А02, через це ми коротко зупиняємося на їх характеристиках. Двигуни виготовлялися на номінальні напруги 220, 380, 660 В.

Крім основного виконання в серії передбачені ряд модифікацій і спеціалізованих виконань: з підвищеним пусковим моментом (АОП2)

призначених для привода з великими статичними і інерційними навантаженнями в момент пуску. Ступінь захисту – IP44, номінальний режим роботи тривалий S1; асинхронні електродвигуни А02 з підвищеним ковзанням (АОС2) призначені для роботи в приводі механізмів, що характеризуються наявністю великих махових мас і нерівномірним ударним характером графіка навантаження, а також для приводів з великою частотою пусків, реверсів і гальмувань. Ступінь захисту – IP44; багато швидкісні електродвигуни серій А2, А02 – призначені для привода механізмів із ступеневим регулюванням частоти обертання й інші.

Зовнішній вигляд асинхронних трифазних електродвигунів серії А2 приведений на рис. 7.38, а електродвигунів серії А02 – на рис. 7.39.

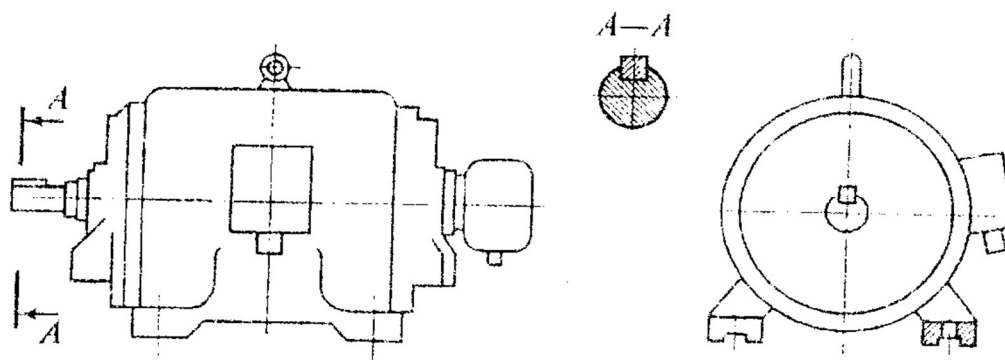


Рис. 7.38. Зовнішній вигляд асинхронних електродвигунів серії А2

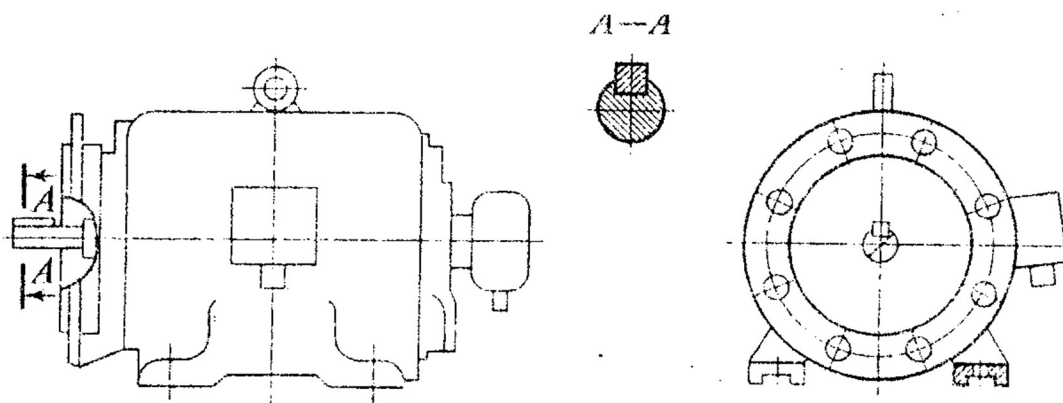


Рис. 7.39. Зовнішній вигляд асинхронних електродвигунів серії А02

7.4.3.8. Вибухозахищені асинхронні електричні двигуни

Вибухозахищені електричні двигуни розділяються на двигуни, призначені для експлуатації у вибухонебезпечних приміщеннях (зони класу 0, 1, 2, 20, 21, 22) і в зовнішніх установках; рудничні електричні

двигуни для застосування в підземних виробках вугільних шахт. Відрізняються від двигунів загального призначення конструкцією, матеріалами оболонок і ущільненнями, які забезпечують потрібний вибухозахист, ізоляцією обмоток, номінальною напругою, пов'язану з умовами електроживлення двигунів, що працюють в підземних виробках, механічними характеристиками, визначеними специфічними вимогами привода вугільних машин.

Ступінь захисту і конструкція двигунів обумовлюються вибухонебезпекою приміщень, для роботи в яких вони призначені, і наявністю в оточуючому середовищі газів, парів, пилу або горючих волокон, котрі можуть створювати вибухонебезпечні суміші з повітрям.

В технічних описах вибухозахищених двигунів вказуються умови експлуатації двигунів за видом їх вибухозахисту в позначеннях (згідно Правил будови електроустановок).

Асинхронні вибухозахищені електродвигуни серії ВАО призначені для експлуатації у приміщеннях, небезпечних та газоповітряним сумішами, а також в сланцевих і вугільних шахтах, небезпечних по газу (метану) або вугільному пилу. Зовнішній вигляд двигуна приведений на рис. 7.40.

Ця серія має ряд модифікацій котрі розрізняються елементами конструкції, технічними даними і рівнем вибухозахисту.

Умовне позначення двигунів серії складається з трьох букв: ВАО – вибухозахищений, асинхронний, обдувний.

Двигуни призначені для експлуатації в приміщеннях всіх класів, небезпечних по газоповітряним сумішами, віднесених за вибухонебезпечністю до 1–3-ї категорії вибухонебезпечних сумішей та групами А, Б, Г. З температурою самозаймання сумішей в межах від 175 до 450°C.

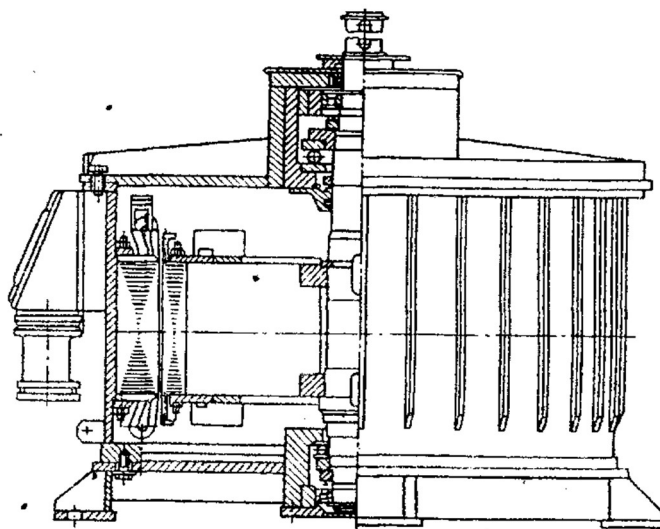


Рис. 7.40. Зовнішній вигляд асинхронного трифазного електродвигуна серії ВАО - 7, виконання ВЗГ

Двигуни серії ВАО призначені для тривалого номінального режиму роботи S1 від мережі змінного трифазного струму.

Двигуни мають виконання за вибухозахистом РВ, ВЗГ і розраховані для роботи при температурі навколишнього повітря від -40 до $+40^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості 97%, при температурі $+35^{\circ}\text{C}$ для помірного клімату.

Ступінь захисту двигунів від зовнішнього середовища - не нижче IP54.

Асинхронні електродвигуни серії ВАО для роботи в середовищах 4 категорії (за вибухонебезпечною сумішшю) - призначені для роботи в режимі S1 від мережі змінного струму частотою 50 і 60 Гц напругою до 600Вт в приміщеннях і зовнішніх установах, небезпечних за газоповітряним сумішами (рисунки 7.41 і 7.42).

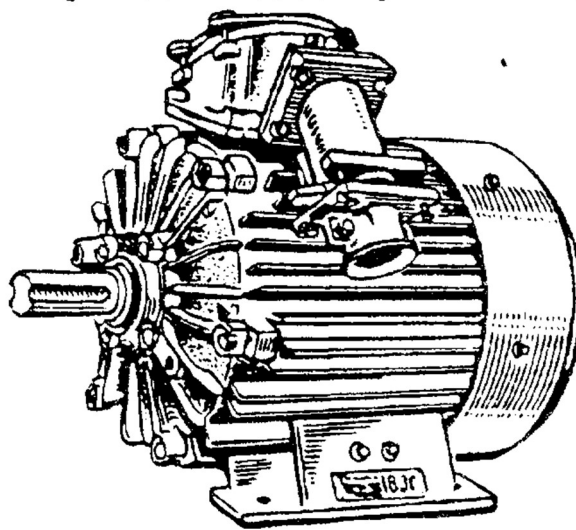


Рис. 7.41. Зовнішній вигляд асинхронного трифазного електродвигуна серії ВАО - 62 - 4, виконання ВЗГ

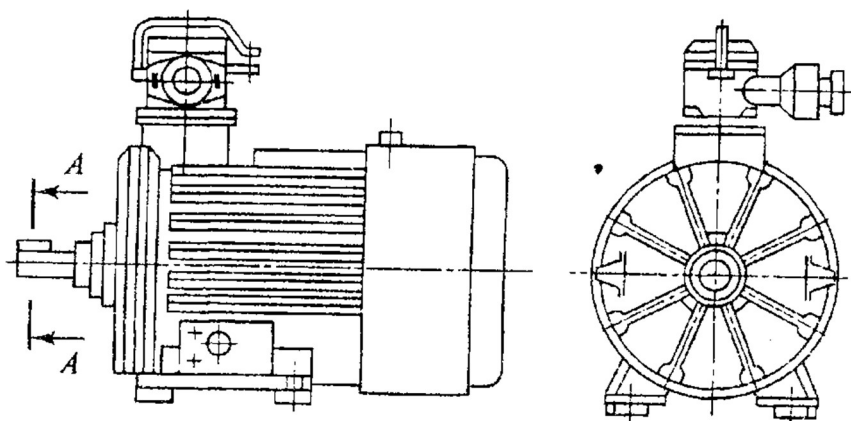


Рис. 7.42. Зовнішній вигляд асинхронного трифазного електродвигуна серії ВАО, виконання IM1081

Асинхронні вибухозахищені електродвигуни серії В, ВР - працюють в діапазоні потужностей від 0,25 до 110 кВт. Двигуни мають основне виконання і ряд модифікацій, що розрізняються технічними даними і особливостями конструкції.

Електродвигуни призначені для роботи в шахтах, приміщеннях і зовнішніх установках, небезпечних за газом (метаном) або вугільного пилу.

Виконання позначаються В, ВР, прийняті основними в серії (буква Р означає рудничне виконання).

Номинальний режим роботи двигунів - S1. Виконання двигунів за ступенем захисту IP54.

На рис. 7.43. приведений позовжній переріз електродвигуна серії ВР.

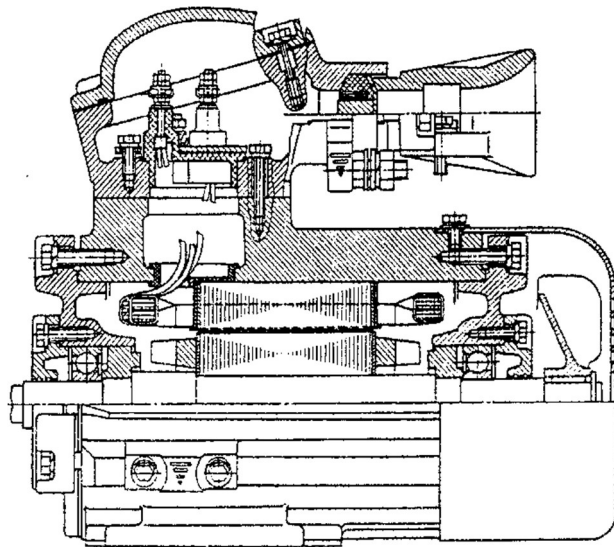


Рис. 7.43. Асинхронний трифазний електродвигун серії ВР (поздовжній) переріз

7.4.3.9. Синхронні машини

Синхронні електричні машини застосовують в якості генераторів на стаціонарних і пересувних електричних станціях. На стаціонарних електростанціях потужність синхронних генераторів досягає 8000 кВт, а на пересувних від 5 до 50 кВА.

Синхронні двигуни бувають трифазними і занадто потужними від 100 до 10000 кВт і використовують для нерегульованого приводу потужних насосів, компресорів і інших агрегатів, не вимагаючи регулювання частоти обертання або потребуючих постійної частоти обертання. Друга протилежність синхронних двигунів – це однофазні мікро двигуни, потужністю від часток Вт до десятків Вт. Такі двигуни

використовуються у виконавчих електроприводах систем автоматики, телемеханіки, інформаційно-вимірювальній техніці.

Відміна синхронних двигунів (СД) від асинхронних полягає в тому, що їх ротор (індуктор) електромагніт, постійний магніт або явнополюсна магнітна система. В результаті ротор СД обертається за напрямом з тією ж швидкістю обертання, що і магнітне поле, утворене обмоткою статора, тобто $\omega = \omega_0$. Звідси і назва цього виду машин - синхронні.

Асинхронний пуск трифазного СД.

Схема вмикання СД приведена на рисунку 7.44,а.

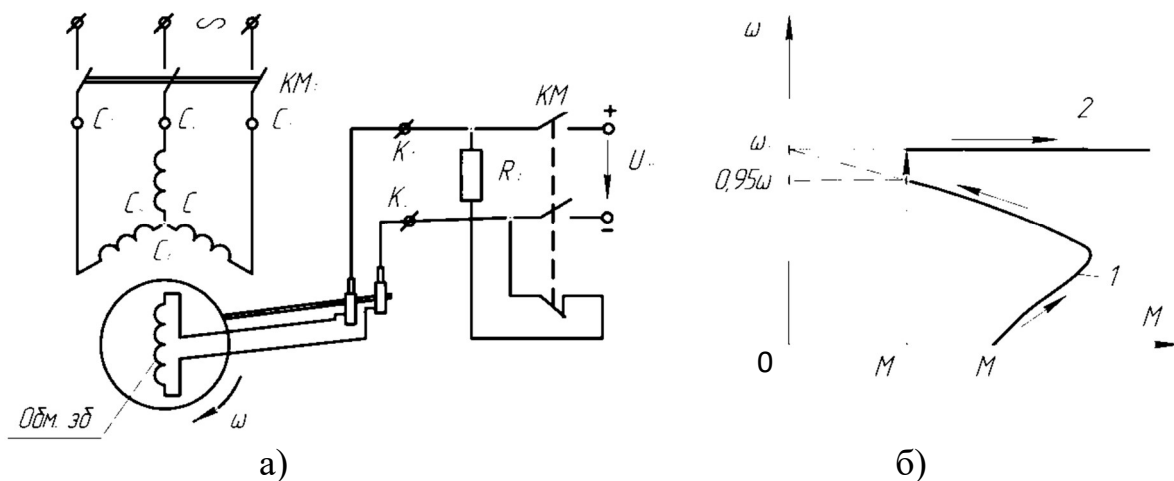


Рис.7.44,а. Вмикання синхронного двигуна в мережу:

а - схема вмикання;

б - механічні характеристики при пуску (1) і роботі (2)

На період пуску обмотку збудження (Обм.зб.) (на роторі) СД вимикають від напруги збудження $U_{зб}$, одночасно з метою виключення перенапруг в момент пуску і полегшення пускового режиму її замикають на зовнішній активний опір R_3 , який у 8-12 разів перевищує активний опір самої обмотки збудження.

Полегшення асинхронного пуску СД сприяє перш за все спеціальна пускова (демпферна) обмотка двигуна, яка розташована в пазах на зовнішній поверхні ротора – індуктора і є схожістю з короткозамкненою обмоткою ротора асинхронного двигуна. Через це пускова механічна характеристика СД подібна механічній характеристиці асинхронного двигуна (рис. 7.41, б, крива 1). При досягненні підсинхронної кутової швидкості $0,95\omega_0$ в обмотку збудження подають напругу, і двигун утягується в синхронізм, переходить на свою абсолютно жорстку механічну характеристику (рис. 7.41, б, пряма 2).

Перевага СД за зрівнянням з асинхронними двигунами – не тільки в постійності частоти їх обертання при змінні навантаження, але і те, що при потужностях більше 200 кВт вони стають економічно доцільними у використанні. Пов'язано це з тим, що при роботі з підвищеним збудженням СД забезпечує компенсацію реактивної потужності паралельно працюючих споживачів з індуктивною складовою струму навантаження, тим самим розвантажує мережу від реактивного струму, підвищує $\cos \varphi$ знижує втрати енергії в мережі живлення.

До недоліків синхронних двигунів слід віднести те, що вони характеризуються відносно складним процесом пуску, здатні випадати із синхронізму при перевантаженнях, ускладнюють можливість регулювання частоти обертання виконавчого механізму і пов'язані з необхідністю застосування постійного і змінного струмів одночасно.

Відмічені особливості синхронних електродвигунів є причиною того, що вони найбільш широко застосовуються для потужних приводів механізмів з нечастими пусками, коли необхідно мати незмінну частоту обертання, наприклад, компресори, насоси, кузняно-пресувне обладнання й інші.

7.5. Синхронні двигуни

Як було зазначено раніше, синхронні машини використовують в якості як двигунів, так і генераторів. В основному трифазні синхронні генератори застосовуються на електростанціях для виробництва електричної енергії. В промисловому виробництві синхронні двигуни використовуються великих потужностей від 100 кВт і вище.

В кількісному відношенні синхронних двигунів у сфері виробництва значно менше, ніж асинхронних і складають одиниці відсотків.

Разом з тим, синхронні двигуни працюють на відповідальних ділянках виробництва і знання особливостей їх роботи і експлуатації мають важливе практичне значення.

7.5.1. Синхронні генератори

Робота електромеханічного перетворювача (у вигляді одного витка, що рухається у магнітному полі) в режимі генератора розглянуто у розділі 7, п.7.1, рис. 7.1. Будова синхронного генератора одержаного трифазного струму, у спрощеному вигляді показаний на рис. 7.1. Описаний там генератор є тільки схемою, що пояснює принцип дії.

На електростанціях поширені трифазні синхронні генератори з нерухомим статором. Ці генератори мають велику потужність (до 300000 кВт і більше) і розраховані на високі напруги (до 24000 В).

Розглянемо більш конкретно будову та принцип роботи синхронного генератора. Синхронний генератор складається з нерухомої частини –

статора 1 (рис. 7.25). Статор генератора нічим не відрізняється від статора синхронного чи асинхронного двигунів.

У позях статора 2 розміщують трифазну обмотку 3, і обертової частини ротора 4, що являє собою електромагніт (індуктор), який живиться постійною напругою збереження $U_{зб}$ через щітки 5 і кільця 6.

Ротори синхронних генераторів, як і синхронних двигунів бувають двох типів – з явно виявленими полюсами і неявно полюсами. Ротори з явно вираженими полюсами установлюють у генераторах з невеликим числом обертів. Їх звичайно з'єднують з тихохідними первинними двигунами (ПД), з гідротурбінами або з двигунами внутрішнього згоряння і називають відповідно гідрогенераторами або дизельгенераторами.

Ротори з неявно виявленими полюсами застосовують у генераторах з великим числом обертів (3000 об/хв.). Ці генератори звичайно проводять у рух парові турбіни, тому їх називають турбогенераторами. Сердечники і баштаки полюсів найчастіше виготовляють з литої сталі, іноді баштаки складають з окремих листів електротехнічної сталі, а для обмотки полюсів використовують мідні ізольовані проводи.

Щоб мати синусоїдальну ЕРС треба мати синусоїдальний розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі між статором і ротором. Для цього полюсним наконечникам надають такої форми, що на краях полюсів повітряний зазор більший, ніж під його серединою, тому під серединою полюса магнітна індукція має максимальне значення. Полюси електромагніту розташовані на віддалі полюсного кроку τ (віддаль між осями полюсів). У тілі статора розміщують обмотки, кожна з яких зміщена відносно другої також на віддаль τ . При обертанні індуктора в обмотках індукується ЕРС, частота якої f залежить від числа пар полюсів p і кількості обертів індуктора за хвилину n :

$$f = P \cdot N / 60 \quad (7.68)$$

Якщо трифазний синхронний генератор ввімкнути в мережу, то по обмоткам якоря (статора), число полюсів якого дорівнює числу полюсів індуктора, піде трифазний змінний струм, який створює обертовий магнітний потік (обертове магнітне поле) (див. п.7.4.3.), швидкість якого:

$$N_0 = 60 \cdot f / p.$$

Цей потік у взаємодії із магнітним потоком індуктора змушує рухатись індуктор (ротор) з тією самою швидкістю n . Отже, $n_0 = n$, тобто число обертів магнітного поля статора дорівнює числу обертів ротора. Збіг у часі двох явищ називається синхронізмом, тому такий генератор називають синхронним.

Для забезпечення живлення кола збудження синхронної машини на спільному з генератором валі встановлюється так званий збудник у вигляді окремої машини постійного струму. В якості збудника вибирається машина постійного струму з самозбудженням, до щіток якої і

приєднується коло збудження синхронного генератора. Її потужність становить 0,25-1% від номінальної потужності основного генератора.

Останнім часом у зв'язку з розвитком напівпровідникової силової техніки, постійний струм в обмотку збудження подається від силового діодного випрамляча, або тиристорного перетворювача змінного струму в постійний з регулюванням величини струму, що живить індуктор.

7.5.1.1. Холостий хід синхронного генератора

Холостий хід синхронного генератора – це такий режим його роботи, коли він не ввімкнений в мережу (на навантаження), тобто на затискачах генератора є номінальна напруга, але струм навантаження дорівнює нулю. Під час тиску вал генератора 3 (рис. 7.26), який з'єднаний з ПД, приводиться в обертальний рух. Число обертів ротора доводять до номінального значення. Потім до обмотки збудження (о. зб.) ротора 2 через щітки 5 і кільця 4 подають постійний струм від окремого джерела постійного струму (на рис. 7.26 це напівпровідниковий тиристорний перетворювач VC). Величину струму збудження можна змінювати практично від нуля до певного максимального значення, що дає змогу регулювати напругу генератора. Струм збудження $I_{зб}$ створює магнітний потік ϕ_0 , який, рухаючись разом з ротором, перетинатиме обмотку статора 1 і за законом магнітної індукції наводитиме в кожній її фазі ЕРС E_0 :

$$E_0 = 4,44 K_{об} \omega f \phi_0,$$

де $K_{об}$ – обмотковий коефіцієнт, який ураховує конструктивні особливості обмотки. Звичайно, $K_{об} = 0,92-0,94$; ω – число витків обмотки однієї фази статора, сполучених послідовно.

Оскільки $f = p \cdot n / 60$, то при $n = 50$ Гц = const число обертів ротора синхронного генератора повинно бути сталим і залежить тільки від числа пар полюсів p машини:

$$E_0 = 4,44 \cdot \phi_0 \cdot \omega \cdot p \cdot n / 60 \text{коб, або}$$

$$E_0 = c \cdot n \cdot \phi_0$$

$$\text{де } c = 4,44 \cdot \omega \cdot p / 60 = \text{const.}$$

Таким чином, ЕРС синхронного генератора пропорційна швидкості обертання і магнітного потоку ротора. Для сталої частоти кількість обертів n також буде сталою. Отже, значення ЕРС E_0 визначається тільки величиною діючого потоку ϕ_0 машини і називається ЕРС холостого ходу.

Для холостого ходу струм якоря дорівнює нулю, тому фазна напруга генератора дорівнює ЕРС.

На рис. 7.27, а зображено векторну діаграму синхронного генератора при холостому ході.

Характеристика холостого ходу синхронного генератора (рис. 7.27, б) – це залежність ЕРС генератора від струму збудження: $E_0(I_{зб})$ для $I_{\phi} = 0$, $n = \text{const}$.

За формулою (7.71) ЕРС статора при незмінній швидкості $U=\text{const}$ пропорційна потоку, тому залежність E_0 від $I_{зб}$, подібна до залежності магнітного потоку від струму збудження. У початковій частині залежність E_0 від $I_{зб}$ практично лінійна; надалі, у зв'язку з магнітним насиченням, характеристика набирає вигляду кривої намагнічування. На характеристиці можна вибрати робочу точку, яка відповідає номінальній напрузі генератора $U_{\text{ном}}$. Якщо при навантаженні генератора напруга спадає, то її регулюють змінюючи струм збудження тиристорним перетворювачем.

7.5.1.2. Робота синхронного генератора під навантаженням.

Реакція якоря.

Розглянемо роботу трифазного синхронного генератора при симетричному навантаженні $I_A=I_B=I_C=I_{\text{я}}$ (рис. 7.26), коли він працює незалежно від інших синхронних машин. При приєднанні зовнішнього навантаження (мережі), то під дією E_0 як по зовнішньому колу, так і по обмотці статора (якоря) піде струм $I_{\text{я}}$. Величина і фаза цього струму залежатимуть від ЕРС генератора, а також від активного та реактивного опорів зовнішнього кола і самого генератора. Струм, що проходить по обмоткам статора (якоря), створює свій магнітний потік. Частина цього потоку замикається тільки навколо проводів якоря (рис. 7.28) і називається потоком розсіювання ϕ_s , замикається через повітряні зазори і полюси ротора. Потік ϕ_a є обертовим потоком створеним трифазним струмом, який обертається синхронно з полем ротора ϕ_0 . Таким чином, потоки ϕ_0 і ϕ_a збігаються за просторовим розміщенням і обертаються з однаковою швидкістю, утворюючи єдиний магнітний потік машини:

$$\Phi = \phi_0 + \phi_a$$

Потік ϕ_a накладаючись на основний потік полюсів ϕ_0 , ослаблює або підсилює його. Вплив н. с. якоря на основне магнітне поле називається реакцією якоря.

Вісь потоку ϕ_a відносно потоку ротора ϕ_0 визначається характером навантаження : активне, індуктивне, ємнісне, мішане. Ці два потоки додаються геометрично. На рис. 7.28 зображено векторні діаграми магнітних потоків для різних навантажень. У всіх випадках розглядається момент коли у фазі А струм має максимальне значення ($I_A=I_{\text{макс}}$); вісь потоку ϕ_a (результуючий потік усіх трьох фаз) у всіх випадках зображають горизонтальною лінією, перпендикулярно до площини котушки А – Х.

Активне навантаження

На рис. 7.28,а активні про води фази А-Х обмотки якоря розташовані проти середини полюсів ротора. Наведена у фазі ЕРС і струм матимуть одночасно найбільші значення тому, що вони збігаються за фазою. Струми в обмотці якоря створює потік ϕ_a , магнітні лінії якого

замикаються поперек полюсів, такий потік у повітряному зазорі зображено на векторній діаграмі. Ефект реакції – сумарний магнітний потік – за величиною залишається майже незмінним, але трохи змінює свій напрям внаслідок того, що потік якоря ослаблює потік полюсів у набігаючих половинах і посилює його в збігаючих половинах полюсів.

Індуктивне навантаження

Для індуктивного навантаження (рис. 7.28, б) генератора струм у кожній фазі якоря відстає за часом від відповідної ЕРС на 90° ($1/4$ періоду). Отже, момент, коли $I_A = I_{\text{макс}}$, вісь ротора повернеться на 90° уперед. Потоки ϕ_0 і ϕ_a направлені назустріч один одному, тому ефект реакції полягає в розмагнічуванні основного потоку машини і зменшенні результуючого потоку ϕ , а отже, і ЕРС E , що наводиться цим потоком в якорі генератора.

Ємнісне навантаження

Для ємнісного навантаження струм випереджує ЕРС на чверть періоду (рис. 7.28, в). Максимальне значення струму у фазі А настане за чверть періоду до того, як вісь ротора розміститься так, як це було у випадку активного навантаження. Потоки ϕ_0 і ϕ_a збігаються за напрямом, реакція якоря намагнічує основний потік машини, збільшуючи його і ЕРС E .

Зміну ЕРС, а отже, і напруги на затискачах генератора для навантаження можна легко простежити за робочою або зовнішньою характеристикою, яка показує залежність $U(I)$ для $i_{3\phi} = \text{const}$ і $n = \text{const}$. (рис. 7.29). Як видно із рис. 7.29, зовнішні характеристики синхронного генератора різні залежно від роду навантаження, при чому найбільш крута зовнішня характеристика має місце при чисто індуктивному навантаженні (крива 2).

Більш пологий характер має зовнішня характеристика для активного навантаження (крива 1) і, на кінець, особливий вигляд одержала зовнішня характеристика для ємнісного навантаження, коли із зростанням навантаження має місце підвищення напруги на затискачах генератора (крива 3).

Зовнішні характеристики для випадків мішаного навантаження розташуються, очевидно, між основними кривими (пунктирні криві).

З такими характеристиками синхронний генератор працює за умови, що його ЕРС залишається незмінною. На практиці при експлуатації синхронних генераторів необхідно підтримувати на їх затискачах незмінну величину напруги незалежно від величини і виду навантаження. Це досягається тим, що ЕРС генератора не залишається незмінною, а її величина регулюється шляхом зміни струму збудження одночасно зі зміною навантаження. За таким регулюванням синхронний генератор може працювати як і генератор постійного струму по зовнішній характеристиці,

що має вигляд прямої лінії, паралельній осі абсцис. Така характеристика показана на рис. 7. 30.

У синхронних генераторів, як і у генераторів постійного струму, мається також і регулювальна характеристика $I_{36}(I)$ при $U=\text{const}$. Характер регулювальної характеристики буде, проте, у синхронного генератора залежати від виду його навантаження – активного і індуктивного чи ємнісного. Регулювальні характеристики синхронного генератора для різних видів навантажень наведені на рис. 7.31.

Як видно з рис. 7.31, для активного навантаження ($\cos \alpha=1$) і для активного – індуктивного ($\cos \alpha=0,8(RL)$) із збільшенням навантаження струм збудження треба збільшувати, а для ємнісного ($\cos \alpha=0,8(RC)$), – зменшувати.

Щоб краще уявити фізичну сторону зміни напруги, накреслимо векторну діаграму синхронного генератора для активно-індуктивного навантаження (рис. 7.32). Головним потоком ϕ_0 індукується ЕРС E_0 , яка відстає від ϕ_0 на кут $\Pi/2$. Під дією E_0 в колі виникає струм I_a , який відставатиме від E_0 на певний кут. Струм I_a в обмотці статора створить потік розсіювання ϕ_s і потік ϕ_a , які за напрямом збігаються з струмом, якщо не враховувати вплив гістерезису і вихрових струмів. Потік розсіювання ϕ_s наводить в обмотці статора ЕРС розсіювання або самоіндукції – E_s або E_L , а потік реакції якоря ϕ_a – ЕРС E_a які відстають від відповідних потоків на кут 90° .

Додаючи потоки ϕ_0 і ϕ_a дістаємо результуючий потік ϕ . Цей потік наводить в обмотці статора ЕРС E , яка менше від ЕРС E_0 на величину E_a : $E=E_0-E_a$.

Нехтуючи активним напруги IR , який менший відвід одного відсотка номінальної напруги, напишемо рівняння:

$$E_0=U+IX_L+IX_a=U+IX=U+U_x$$

Величина $X=X_a+X_L$, яка враховує дію потоку реакції і потоку розсіювання якоря, називається синхронним індуктивним опором.

7.5.1.3. Паралельна робота синхронних генераторів

На електричних станціях установлюють кілька генераторів, які працюють паралельно, віддаючи свою енергію на спільні шини. Залежно від потрібної потужності вмикають таку кількість генераторів, яка б забезпечувала повне навантаження кожного з них. Це збільшує ККД генераторів і поліпшує використання устаткування.

Так, наприклад, на Канівській гідроелектростанції встановлено 24 гідрогенераторів загальною потужністю 444 тис. кВт.

Для ввімкнення на паралельну роботу синхронних трифазних генераторів треба, щоб виконувались такі умови:

1. Напруги діючого генератора U_1 (або напруга мережі) і генератора, який під'єднують, U_2 , повинні бути рівними: $U_1=U_2$.
2. Напруги генераторів повинні бути зсунуті за фазою один відносно другого на 180° (рис. 7.34, а), а відносно споживачів – діяти узгоджено, тобто збігатися за фазою.
3. Частоти генераторів повинні бути рівними: $f_1=f_2$.
4. Чергування фаз генераторів повинно бути однаковим: $A_1 B_1 C_1$ і $A_2 B_2 C_2$.

Усі операції по підготовці генератора до його вмикання на паралельну роботу називають **синхронізацією**, а прилади, що показують момент вмикання, синхроскопами.

Раніше існували і використовувались лампові і стрілочні синхроскопи. Ці синхроскопи не давали можливості швидко вмикати генератори на паралельну роботу, особливо для аварійних режимів, коли напруга і частота коливаються в широких межах. Крім того, лампові і стрілочні синхроскопи потребують великої кількості ламп розжарювання та вимірювальних приладів і вимагають багато часу для складання схеми.

Останнім часом широко застосовують спосіб синхронізації генераторів – спосіб самосинхронізації, що дає можливість вмикати генератори на паралельну роботу за короткий проміжок часу навіть при значних коливаннях частоти і напруги в мережі.

Суть способу самосинхронізації полягає в повній авторизації полягає в повній автоматизації цього процесу. Генератор, який обертається первинним двигуном з числом обертів, що можуть відрізнитися на 2-5% від номінальних, вмикається у мережу без збудження. Відразу після цього автоматично з витратою часу в його обмотку збудження подається струм збудження, внаслідок цього він протягом 1-2 с. втягується в синхронізм і бере на себе відповідне навантаження.

Для вмикання генератора в мережу його обмотка збудження повинна бути замкнута на активний зарядний опір, що в 5-10 разів більший за опір обмотки збудження, з метою зменшення напруги на її затискачах у момент пуску і уникнути її пошкодження.

7.5.1.4. Особливості експлуатації синхронних генераторів

У процесі експлуатації синхронних генераторів, що працюють паралельно на спільну мережу, черговому персоналу доводиться перерозподіляти активне і реактивне навантаження згідно з графіком навантаження в реальному часі. Розглянемо фізичну сторону явищ, які виникають в процесі перерозподілу навантаження генераторів.

Регулювання активного навантаження

В разі паралельної роботи синхронного генератора в потужній енергетичній системі його напруга і частота не можуть довільно змінюватись, вони завжди дорівнюють напрузі і частоті системи.

Активну електричну потужність, яку віддає генератор можна зобразити відомою формулою:

$$P=3UI\cos\alpha$$

де U і I – діючі значення фазної напруги і струму. Механічна потужність, яка передається генератору первинним двигуном, визначається за формулою:

$$P_{\text{мех}}=Mw_{\text{рот}}$$

де M – протидіючий електромагнітний момент генератора;

$w_{\text{рот}}$ - кутова швидкість обертання ротора.

У генераторі механічна потужність перетворюється в еквівалентну електричну потужність.

Нехтуючи втратами в генераторі і прирівнюючи електричну та механічну потужності, знайдемо електромагнітний момент генератора:

$$M_{\text{ем}}=\frac{3UI\cos\alpha}{w}$$

де $w_{\text{рот}}=\frac{2\pi\cdot n}{60}$; n – число обертів ротора за хвилину.

Ураховуючи, що число обертів ротора дорівнює обертів поля ($n = \frac{60f}{p}$), дістанемо:

$$M = \frac{P \cdot 3UI \cdot \cos\varphi}{2\pi \cdot f}$$

Корисна робота первинного двигуна полягає в подоланні цього протидіючого електромагнітного моменту. Затрачена механічна потужність первинного двигуна поновлюється у формі еквівалентної активної електричної потужності.

На рис. 7.35. приведена спрощена векторна діаграма генератора, що працює паралельно з мережею. На цій діаграмі під U розуміється фазове значення напруги U_{ϕ} на загальних шинах, на які працюють паралельно синхронні генератори прийнята постійно за величиною, а E_{ϕ} – фазове значення ЕДС генератора. Із зробленої на діаграмі геометричної побудови випливає, що величина відрізка av може бути виражена як

$$av = E_{\phi}\sin\theta=IX_c\cos\varphi, \quad (7.75)$$

звідки отримуємо:

$$I\cos\varphi=\frac{E}{X} \sin\theta . \quad (7.76)$$

Підставляючи $I\cos\varphi$ в 7.74 дістанемо:

$$M = \frac{3P}{2\pi f} \cdot \frac{UE}{X} \cdot \sin\theta . \quad (7.77)$$

Якщо U_ϕ і E_ϕ у вольтах, X_c – індуктивний опір синхронного генератора в омах, то M_{em} матимемо в Ньютон-метрах або в джоулях.

Якщо струм збудження генератора не змінюється $I_{зб} = \text{const}$, то і ЕРС $E_\phi = \text{const}$. При роботі генератора на потужну мережу його напруга також є незмінною $U = \text{const}$. У такому разі в рівнянні (7.77) усі величини, крім $\sin\theta$, є сталими і електромагнітний момент стає функцією кута θ :

$$M_{em} = k \sin\theta, \text{ де } k = \frac{3P}{2\pi f} \cdot \frac{UE}{X}. \quad (7.78)$$

Фізична картина явищ у синхронному генераторі при зміні його активної потужності подана на рис. 7.36.

Для холостого ходу $\theta = 0$ роторний магнітний потік симетрично замикається по ротору і статору. Але між різнойменними полюсами існують сили взаємного притягання, які умовно зображені на рис. 7.36 у вигляді спіральних пружин. Коли полюси статора і ротора містяться один проти одного, корисний обертальний момент первинного двигуна і протидіючий електромагнітний момент регенератора дорівнюють нулю. Первинний двигун витрачає певну потужність лише для покриття втрат холостого ходу. Якщо збільшити потужність первинного двигуна, то ротор генератора піде вперед на кут θ (рис. 7.36, б). Це той самий кут θ , який позначений на векторній діаграмі (рис. 7.35), тому що вісь магнітного потоку в роторі відповідає вектору E_ϕ , а вісь потоку в статорі – вектору U_ϕ .

У генераторі виникає електромагнітний гальмовий момент M_T , який намагається повернути ротор у попереднє положення. Потужність первинного двигуна перетворюється в генераторі в активну електричну потужність $P = 3UI \cos\varphi$.

Якщо у формулу потужності значення $I \cos\varphi$ із (7.76), будемо мати:

$$P = \frac{3UE}{X} \cdot \sin\theta = \frac{\sqrt{3}U \cdot \sqrt{3}E}{X} \cdot \sin\theta = \frac{UE}{X} \cdot \sin\theta, \quad (7.79)$$

де U і E – лінійні значення напруги і ЕРС.

Оскільки напруга $U = \text{const}$, зміна потужності первинного двигуна зв'язана із зміною струму, що надходить у мережу. Електромагнітний гальмівний момент, внаслідок чого настає нова рівновага. Отже, ротор генератора йде попереду поля статора $\theta > 0$ потужність передається від ротора статору і потім у мережу. Це так званий режим генератора синхронної машини. Активна потужність генератора змінюється тільки із зміною потужності первинного двигуна (зміною подачі пари в парову турбіну, або води – в гідротурбіну).

Для $\theta < 0$ - синхронна машина працює в режимі двигуна (руховий режим) вісь кожного полюса ротора під дією гальмівного моменту навантаження M_T буде відставати від відповідної вісі полюса поля статора на кут θ , внаслідок чого між ротором і статором виникають тангенціальні складові, які утворюють електромагнітний обертальний момент.

Стійкість та кутова характеристика для паралельної роботи синхронних генераторів

Електромагнітний момент синхронного генератора пропорційний синусу кута θ (7.77). Ця залежність зображена кривою на рис. 7.37.

Із рисунка видно, що електромагнітний момент генератора, а отже, і його активна потужність при $\theta = 90^\circ$ має максимальне значення. Для дальшого збільшення обертового моменту первинного двигуна і кута θ магнітний зв'язок між ротором і статором порушується, генератор виходить із синхронної паралельної роботи. Границя можливого активного навантаження синхронного генератора без порушення синхронного зв'язку з системою називається його статичною стійкістю. Отже, паралельна робота синхронного генератора з системою можлива при наявності певного синхронізуючого моменту $M_{\text{синхр}}$.

Робота генератора є стійкою, якщо додатному приросту кута $\Delta\theta$ відповідає також додатний приріст електромагнітного моменту ΔM . Відношення $\Delta M / \Delta\theta$ є мірою синхронізуючого моменту. Переходячи до диференціалів, матимемо:

$$M = \frac{dM}{dt} = \frac{3P}{2\pi f} \cdot \frac{UE}{X} \cdot \cos\theta = K \cos\theta = M \cdot \cos \quad (7.80)$$

На рис. 7.37 крива синхронізуючого моменту зображена пунктиром. З рисунка видно, що при $\theta = 90^\circ$ синхронізуючий момент дорівнює нулю, і генератор випадає з синхронізму (втрачає навантаження). Щоб синхронна робота була стійкою, кут θ беруть $\theta \ll 25^\circ$.

Здатність синхронного генератора зберігати синхронний зв'язок із системою при аварійних режимах, наприклад, при коротких замиканнях на лініях, характеризується динамічною стійкістю.

Регулювання реактивного навантаження синхронного генератора

Що стосується реактивного навантаження синхронних генераторів і регулювання цього навантаження, то це цілком пов'язано з збудженням генератора. У синхронного генератора, включеного в мережу, напруга на його затискачах дорівнює напрузі мережі. Якщо генератору дано таке збудження, при якому його ЕРС більше цієї напруги, то генератор буде завантажуватись таким струмом, який викличе поздовжню розмагнічуючу реакцію якоря, що знижує ЕРС генератора до величини напруги на його затискачах. Таким струмом, як відомо із розібраної вище теорії реакції якоря в синхронних машинах, являється для генератора струм, відстаючий по фазі від напруги, або струм індуктивного навантаження, а для мішаного навантаження – відстаюча за фазою від напруги реактивна складова струму.

Отже, для того, щоб завантажити синхронний генератор реактивним навантаженням необхідно дати йому таке збудження, для якого його ЕРС буде більшою напруги мережі, в яку включений генератор. Для того щоб регулювати реактивне навантаження необхідно і достатньо змінювати

збудження генератора, підвищуючи його для збільшення і знижуючи для зменшення реактивного навантаження.

Для недозбудження генератора, тобто при збудженні, при якому його ЕРС виявляється меншою напруги мережі, генератор починає споживати реактивну потужність із мережі (що рівноцінно прийняттю випереджаючого реактивного навантаження), так як при цьому реакція якоря стає поздовжньою підмагнічуваною, що і необхідно для того, щоб дозбудити генератор і підвищити його ЕРС.

Практично синхронні генератори завжди працюють тільки з віддачею реактивної потужності, тобто перезбудженням, при якому $E > U$.

Графічна залежність між струмом збудження і струмом якоря $I(I_{36})$ синхронного генератора при сталому активному навантаженні зображені на рис. 7.38. Для малих струмів збудження (ліва частина кривих) генератор працює в режимі недозбудження, при великих (права частина кривих) – у режимі перезбудження. У сучасних системах генератори використовуються тільки права половина кривої, тобто область перезбудження.

Регулювання струму збудження в генераторі, який працює окремо, приводить до зміни напруги на його затискачах і мало впливає на зміну реактивного навантаження.

Регулювання збудження одного генератора, який працює паралельно з системою, проводить до перерозподілу реактивного навантаження між генераторами. Збільшуючи струм збудження, приймають реактивне навантаження на генератор, зменшуючи його, передають реактивне навантаження іншим генераторам. При цьому напруга в системі змінюється, але мало. Регулюючи струм збудження одночасно в кількох генераторах, що працюють паралельно, можна змінити напругу, залишивши без змін розподіл навантаження між ними. Підвищуючи напругу на одній станції і знижуючи її на другій, можна перерозподілити реактивне навантаження між цими станціями. Якщо одночасно змінювати напругу всіх станцій (струмом збудження), можна змінити напругу в системі, не змінюючи розподілу реактивного навантаження між генераторами.

Витрати енергії в синхронному генераторі і ККД

До числа дуже вживаних параметрів, характеризуючи синхронні генератори як джерела електричної енергії, відноситься їх ККД, величина якого являється показником технічної і економічної досконалості даного генератора на сучасному рівні електромашинобудування.

Величина ККД синхронного генератора, як і всякої машини, залежить від наявності неминучих витрат.

В синхронних генераторах втрати складаються з сидуючих окремих складових:

Втрати в обмотці статора від нагрівання її струмом або так звані втрати в міді. Величина цих втрат може бути виражена як

$$\Delta P = 3I^2 R_a \quad (7.81)$$

Втрати в обмотках ротора синхронної машини від її нагрівання струмом збудження або так звані втрати збудження, які оцінюються потужністю збудження. Ці втрати дорівнюють:

$$I_{зб}^2 R_{зб} = U_{зб} I_{зб} = P_{зб} \quad (7.82)$$

де $R_{зб}$ – опір усього кола збудження, включаючи опори регулювальних реостатів.

Втрати в сталі або магнітні втрати синхронного генератора в результаті явищ вихрових струмів і гістерезіса.

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{гист.} + \Delta P_{вихр.}$$

Ці втрати виникають тільки в осерді статора і залишаються сталими незалежно від навантаження. У роторі магнітні втрати дорівнюють нулю, тому що магнітне поле статора обертається синхронно з ротором і не перетинає тіло осердя; власне же поле ротора цих втрат також не викликає, так як воно постійне по величині і нерухоме по відношенню до тіла ротора.

Механічні втрати $\Delta P_{мех.}$ виникають у підшипниках, між кільцями і щітками.

Вентиляційні втрати, що виникають в зв'язку з пропусканням повітря для охолодження. Вони є значними в швидкохідних турбогенераторах. Для їх зменшення застосовують не повітряне, а водневе охолодження, яке збільшує потужність і ККД генератора. Густина водню в 14, 5 разів менша від густини повітря, а тому при обертанні ротора у водні втрати від тертя в багато разів зменшуються. Крім того, водень має високу теплопровідність – у 7,4 разів більшу, ніж повітря. Це дає можливість збільшити потужність генератора.

Проте треба пам'ятати, що якщо до струменя водню, що виходить з якого-небудь вузького отвору, піднести незначне джерело вогню (запалений сірник чи запальничку), то водень загоряється і горить несвітним полум'ям. Для підпалювання суміші із двох об'ємів водню з одним об'ємом кисню з'єднання газів відбувається майже миттєво у всій масі суміші і супроводжується сильним вибухом. Отже, такі генератори і приміщення де вони розташовані є дуже пожежо- та вибухонебезпечними.

Якщо визначити всі втрати через $\sum \Delta P$, то ККД генератора:

$$\eta = \frac{P_{ел.}}{P_{ел.} + \sum \Delta P} = \frac{3UI \cos \varphi}{3UI \cos \varphi + \sum \Delta P} \quad (7.83)$$

ККД генераторів середньої потужності лежить в межах 0,94-0,96, а великої потужності – 0,98-0,99.

На рис. 7.39 зображені криві $\eta(P)$ залежності ККД від навантаження генератора. Як видно із рисунка, найбільший ККД буває при навантаженнях, близьких до номінального. ККД зменшується із зменшенням активної складової струму навантаження.

7.6. Робота синхронної машини в режимі двигуна і синхронного компресора

7.6.1. Режим двигуна

Робота синхронної машини в режимі синхронного двигуна може бути зручно представлена, виходячи з явища оборотності електричних машин. Синхронний двигун є за своєю схемою такою ж синхронною машиною, як і генератор, і складається із тих же частин, а саме: статора з розташованому на ньому трифазної обмотки, що включається на мережу живлення, і ротора з обмоткою збудження, що живиться постійним струмом від стороннього джерела постійного струму. Проте майже завжди машина призначається заводом-виробником для певного режиму роботи, в якому вона повинна володіти цілком конкретними показниками, зафіксованими в технічних умовах (номінальним обертальним моментом, потужністю, частотою обертання, ККД та іншими).

Трифазні синхронні двигуни випускаються на потужність від 20 кВт до декількох десятків тисяч кіловат. Для частот обертання від 100 до 1000 об/хв. двигуни мають зазвичай явно полюсне виконання ротора, для великих частот обертання (1500 і 3000 об/хв.) – неявнополюсне. В залежності від потужності двигуни виконуються на напруги від 220 до 10000 В. Частота обертання двигуна визначається частотою мережі та конструкцією обмотки статора і не залежить від навантажень на валу двигуна.

В режимі двигуна машина працює паралельно з усіма іншими синхронними машинами (генераторами і двигунами), що включені в мережу. Надалі будемо розглядати найбільш характерний режим роботи синхронних двигунів в разі їх живлення від мережі нескінченно великої потужності.

Коли синхронна машина працює як генератор (див. рис. 7.36), ведучою ланкою є ротор, вісь магнітного потоку якого випереджує вісь потоку статора на кут θ . В цьому випадку синхронна машина перетворює механічну енергію в електричну.

Коли синхронна машина працює як двигун, ведучою ланкою стає потік статора, а веденою – потік ротора, який відстає на кут θ і обертається з тією самою швидкістю, що й поле статора; при цьому електрична енергія перетворюється в механічну.

Останнім часом синхронні двигуни отримують все більш широке застосування. Їх потужність в окремих випадках (в хімічних та нафтогазових галузях виробництва) досягають десятків тисяч кіловат. Вони успішно конкурують з асинхронними двигунами в багатьох областях електроприводу. Їх використовують для відцентрових і поршневих насосів і компресорів, для вентиляторів, повітродувок, газодувок, для дробарок і млинів різних конструкцій, прокатних станів і ряду інших пристроїв.

Для порівняння використання асинхронних і синхронних двигунів потужністю від 100 кВт і вище необхідно враховувати їх енергетичні показники.

Асинхронний двигун для збудження магнітного поля статора споживає із мережі значну реактивну потужність (індуктивне навантаження), в той час як синхронний двигун для певного струму збудження може зовсім не споживати реактивного струму або навіть генерувати відстаючий реактивний струм в мережу. Зазвичай синхронні двигуни розраховуються на номінальний коефіцієнт потужності $\cos(-\varphi)=0,9-0,8$.

Порівняльні техніко-економічні розрахунки показників, що для всіх номінальних потужностей синхронний двигун по вартості і втратам енергії мають кращі показники, чим асинхронний двигун разом з компенсуючим конденсаторним пристроєм, що забезпечує $\cos\varphi=1$.

Для оцінки техніко-економічної доцільності застосування синхронних двигунів слід також враховувати, що в разі зниження напруги мережі, в разі виникнення аварійних процесів, підключені до асинхронних двигунів статичні конденсатори стають малоефективними, так як їх реактивна потужність знижується пропорційно квадрату напруги. Пропорційно квадрату напруги знижується також корисний (робочий) момент на валу двигуна. Ці обставини призводять до затягування аварійного процесу, а іноді і до подальшого зниження напруги з непередбачуваними наслідками.

В протилежність цьому синхронні двигуни в разі зниження напруги мережі починають генерувати в мережу додаткову реактивну потужність, що сприяє більш швидкому відновленню напруги.

Синхронні двигуни проектуються зазвичай таким чином, щоб в разі зниження напруги мережі струм збудження двигуна міг бути збільшений в 1,5-2 рази на протязі декількох десятків секунд для підтримки статичної стійкості. Така кратність і тривалість форсування збудження буває цілком достатнім в умовах експлуатації.

7.6.2. Пуск в хід синхронних двигунів

Пустити синхронний двигун без посереднім вмиканням у мережу неможливо. На сьогоднішній день існує два способи пуску синхронних двигунів: синхронний і асинхронний.

1. Синхронний пуск полягає в тому, що спеціальний розгінний пусковий двигун (це може бути асинхронний двигун або двигун постійного струму потужністю до 10% від потужності синхронного двигуна), який з'єднують із синхронним двигуном рознімною муфтою, розкручує ротор навантаженого синхронного двигуна до синхронних обертів. Після розгону ротора до $\omega = \omega_0$ виконують усі операції

синхронізації (див. п. 7.5.1.3). Коли двигун втягує в синхронізм, розгінний двигун витикають. Синхронна машина переходить у режим двигуна, і його вал можна навантажувати. Недоліком цього способу пуску є його складність і висока вартість за рахунок розгінного двигуна і пристроїв синхронізації. Тому тепер цей спосіб не використовується, а для пуску синхронних двигунів застосовують пуск асинхронних.

2. Асинхронний пуск полягає в тому, що синхронний двигун запускається аналогічно асинхронному. Для цього конструктивно у полюсі наконечники (башмаки) ротора закладають пускову обмотку, яка складається з латунних стержнів (рис.7.40).

Латунні стержні з'єднані накоротко з обох торців пластинами, утворюючи, таким чином, короткозамкнену обмотку, подібну до білячого колеса асинхронних двигунів.

Схема асинхронного пуску синхронного двигуна і його пускова та робоча механічна характеристика приведені на рис. 7.41.

Як видно із цієї схеми статор синхронного двигуна може бути безпосередньо включений в мережу. В початковому положенні обмотка збудження ротора увімкнена на активний опір R через нормально замкнений контакт контактора КМ. Це пов'язано з тим, що під час пуску в обмотці збудження ротора індукуються ЕРС, величина якої в розімкненому положенні обмотки може бути небезпечної величини для ізоляції проводів ротора і для обслуговуючого персоналу. Вмикання опору R знижує напругу на затискачах обмотки до безпечної. Крім того, обмотка збудження, увімкнена на активний опір, працює як додаткова синхронна обмотка і створює додатковий пусковий момент, що полегшує пуск двигуна. Величина опору R повинна бути в 8-12 разів більшою за опір обмотки збудження.

Пуск двигуна здійснюється в наступному порядку. Спочатку вмикається вимикач навантаження QW і тим самим до статора синхронного двигуна подається напруга мережі живлення (на пусковій характеристиці рис. 7.41, б точка а). З подачею напруги виникає обертове магнітне поле статора, яке як і в асинхронних двигунах перетинає короткозамкнені витки пускової обмотки ротора і індукуює в них струм. Взаємодія цього струму з обертовим потоком створює пусковий обертальний момент, який розганяє ротор. При досягненні обертів до підсинхронної частоти, приблизно $0,95\omega_0$ (рис. 7.41, б точка б) автоматично вмикається контактор КМ в результаті обмотка збудження ротора вмикається від опору R і вмикається до джерела постійного струму $U_{зб.}$. Взаємодія обертового магнітного поля статора і полюсів ротора створює синхронізуючі сили, які обертають ротор із синхронною частотою ω_0 . Тепер вал двигуна можна навантажувати і двигун буде працювати на абсолютно жорсткій механічній характеристиці – пряма 2 рис. 7.41,б.

Безпосереднє вмикання в мережу синхронного двигуна (прямий пуск) застосовується для двигунів, потужність яких порівняно невелика – до сотень кіловат.

Для асинхронного пуску синхронних двигунів великої потужності застосовують знижену напругу, використовуючи автотрансформатори або ректори.

7.6.3. Векторна діаграма синхронного двигуна, обертальний момент і потужність для $\omega = const$

Із розглянутого принципу дії синхронного двигуна і методів його пуску стає очевидним, що синхронний двигун є звичайною синхронною машиною, використаною в зворотному режимі. Через це всі внутрішні процеси в синхронному двигуні залишаються абсолютно такими ж, як і в синхронному генераторі, а через це не вимагають окремого розгляду. Це дозволяє відразу скласти спрощену векторну діаграму для синхронного двигуна, як це зроблено на рис. 7.42.

На відміну від векторної діаграми синхронного генератора (див. рис. 7.35) на векторній діаграмі синхронного двигуна вектор ЕРС відстає від вектора напруги на його затискачах (рис. 7.42). Це означає, що полюси ротора відстають від обертового поля статора.

Для синхронного двигуна за другим законом Кірхгофа рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$U_{\phi} = E_{\phi} + IX = E_{\phi} + U_x \quad (7.84)$$

На векторній діаграмі двигуна кут зсуву між напругою і ЕРС позначено через θ , між ЕРС і струмом – через ψ , а між напругою і струмом – через φ .

Якщо P_1 – електрична потужність, яку споживає двигун з мережі, то частина цієї потужності йде на покриття втрат у міді обмотки статора P_m , а решта перетворюється в електричну потужність $P_{ем.}$, яка передається з статора на ротор.

Отже,

$$P_{ем.} = P_1 - P_m \quad (7.85)$$

Корисна потужність на валу двигуна P_2 менша від $P_{ем.}$ на величину втрат холостого ходу P_x , які складаються з механічних втрат $P_{мех.}$ і втрат у сталі $P_{ст.}$:

$$P_{xx} = P_{мех.} + P_{ст.} \quad (7.86)$$

$$\text{Отже, } P_2 = P_{ст.} - P_{xx} = P_{ем.} - P_{мех.} - P_{ст.}, \quad (7.87)$$

$$\text{бо } P_{ем.} = P_2 + P_{xx} \quad (7.88)$$

З (7.85) і (7.88) маємо:

$$P_1 = P_2 + P_{xx} + P_m$$

З рівняння потужності (7.89) видно, що потужність, підведена до двигуна P_1 , дорівнює сумі корисної потужності на валу двигуна P_2 , яка йде

на виконання корисної роботи, і потужностей втрат у міді P_m та холостого ходу P_{xx} . Якщо рівняння (7.88) поділити на кутову швидкість обертання ротора $\omega = \frac{2\pi n}{60}$, то матимемо рівняння моментів:

$$\frac{P_{ем.}}{\omega} = \frac{P_2}{\omega} + \frac{P_{xx}}{\omega}, \text{ звідки} \\ M_{ем.} = M_2 + M_{xx}.$$

Отже, електромагнітний момент двигуна $M_{ем.}$ складається з суми двох моментів: M_2 – корисного моменту, який зрівноважується корисним гальмівним моментом при холостому ході двигуна.

Якщо нехтувати активним опором обмотки статора двигуна, зважаючи на його талість, то $P_m = 0$ і з (7.85) матимемо:

$$P_{ем.} = P_1 = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi. \quad (7.91)$$

Поділивши на кутову швидкість, знайдемо обертальний момент двигуна:

$$M_{ем.} = \frac{P_{ем.}}{\omega} = \frac{3UI\cos\psi}{\omega} = \frac{3P}{2\pi f} UI\cos\varphi. \quad (7.92)$$

З векторної діаграми (рис. 7.42) можна написати таке співвідношення:

$$U_\phi \cos\varphi = E_\phi \cos\psi,$$

тобто обертальний момент двигуна пропорційний магнітному потоку і струму статора.

Щоб з'ясувати характер зміни обертального моменту двигуна, зробимо такі перетворення:

З векторної діаграми двигуна (рис. 7.42) $U_x \cos\varphi = E_\phi \sin\theta$; тому що $U_x = IX$,

$$I \cos\varphi = \frac{E_\phi}{X} \sin\theta. \quad (7.95)$$

Підставивши значення (7.95) у (7.93), дістанемо:

$$M_{ем.} = \frac{3P}{2\pi f} \cdot \frac{U_\phi E_\phi}{X} \sin\theta = M_{max} \sin\theta. \quad (7.96)$$

Отже, обертальний момент синхронного двигуна за величиною подібний до моменту синхронного генератора (див. 7.78).

У генераторі цей момент є гальмівним у двигуні, він напрямлений у протилежний бік і є корисним обертальним моментом.

Практично стійка робота синхронного двигуна з навантаженням можлива при $\theta \leq 30^\circ$. Для кутів $\theta > 30^\circ$ робота двигуна буде нестійкою, а при $\theta = 90^\circ$, двигун вийде з синхронізму так як в такому разі синхронізуючий момент дорівнює нулю $M_c = 0$.

7.6.4. Робочі характеристики синхронного двигуна

Робочими характеристиками синхронного двигуна є залежності:

$$\omega, M, \eta, \cos\varphi(P) \text{ для } U = \text{const}; f = \text{const}; I_{36} = \text{const}.$$

Ці залежності приведені на рис. 7.43 і 7.44.д

Частота обертання двигуна $w(P_2)$ в межах від холостого ходу до номінального навантаження і деякого перевантаження залишається сталим і дорівнює синхронній частині обертів w_0 . Сталість частоти обертів зберігається до кінця перевантажувальної спроможності двигуна, яка дорівнює

$$\lambda_{м.} = \frac{M_{\max.}}{M_{\text{ном.}}}, \quad (7.96)$$

Враховуючи (7.95) отримаємо:

$$\lambda_{м.} = \frac{1}{\sin\theta}. \quad (7.97)$$

У сучасних двигунах $\theta = 20^\circ - 30^\circ$, отже, $\lambda_{м.} = 2 - 3$.

Оскільки синхронні двигуни працюють зі сталою швидкістю обертання за сталої частоти, то синхронні двигуни малої потужності (десятки і частки ват), то їх застосовують у пристроях зв'язку різних паралельних процесів, у кіно і телекомунікація, ситопишучих приладах і багато іншого.

Обертальний момент змінюється пропорційно навантаженню. Для холостого ходу ($P_2=0$) момент пропорційний потужності втрат, тому характеристика $M(P_2)$ зберігається до кінця перевантажувальної спроможності двигуна.

Коефіцієнт корисної дії синхронного двигуна визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma\Delta P}. \quad (7.98)$$

Так само, як і в генераторі, сума втрат в двигуні $\Sigma\Delta P$ складається з втрат у міді статора і ротора, у сталі статора і механічних втрат. Для сучасних синхронних двигунів $\eta = 0,9 - 0,97$, причому більші значення стосуються двигунів більшої потужності. Залежність $\eta(P_2)$ досягає свого максимуму при навантаженнях $0,5-0,7$ від $P_{2\text{ном.}}$, а потім повільно спадає за рахунок збільшення втрат.

Коефіцієнт потужності синхронного двигуна у залежності від навантаження зображено на рис. 7.44. Якщо струм збудження встановити таким чином, що його $\cos\varphi=1$ для номінального навантаження двигуна (залежність 1 на рис. 7.44), а потім навантаження зменшувати, то $\cos\varphi$ спадатиме в бік від'ємних кутів зсуву фаз між струмом і напругою ($-\varphi$). Це означає, що для $I_{зб.}=\text{const}$ зменшенню навантаження відповідає перехід двигуна на режим роботи з перезбудженням і, отже, двигун починає споживати випереджаючий струм. Для збільшення навантаження понад номінальне струм відставатиме від напруги, $\cos\varphi$ зменшуватиметься в бік додатніх кутів ($+\varphi$), двигун переходить у режим недозбудження, споживаючи відстаючий струм.

Оскільки синхронні двигуни в основному для електроприводів, що не потребує зміни навантажень (регулювання частоти обертання), то

доцільно струмом збудження встановити такий режим роботи двигуна, щоб він споживав випереджаючий струм. Тоді частково компенсується реактивна складова компенсую чого струму, який споживають асинхронні двигуни і тим самим підвищується $\cos\varphi$ мережі. Залежність 2 (рис. 7.44).

7.6.5. Синхронний компенсатор

Синхронний компенсатор – це синхронний двигун, призначений для роботи без механічного навантаження в режимі перезбудження, і для збільшення коефіцієнта потужності в мережі. На рис.7.45 зображена векторна діаграма компенсації індуктивного зсуву фаз синхронним компенсатором. З рисунка видно, що без компенсатора струм мережі I_1 відстає за фазою від напруги мережі на кут φ_1 . В разі вмикання синхронного компенсатора, який у режимі перезбудження споживає випереджаючий струм, кут зсуву фаз φ між результуючим струмом $I_{рез}$. І напругою зменшується, а отже, збільшується $\cos\varphi$ мережі.

Порівняно з конденсаторами, які застосовуються також для підвищення $\cos\varphi$, синхронні компенсатори дешевші, мають габарити тій самій потужності. Хоч у компенсаторах і більші втрати потужності, проте вони цілком себе виправдовують.

Оскільки синхронні компенсатори не несуть навантаження, їх вали виготовляють легшими, ніж у двигунах. Це зменшує механічні втрати. Крім того, вони мають обмотку збудження з більшим поперечним перерізом, щоб забезпечити тривалу роботу в режимі перезбудження.

Для зменшення втрат у синхронних компенсаторах зменшують повітряний зазор між статором і ротором, а для охолодження компенсаторів потужністю 50 тис. кВА і більше застосовують не повітряне, а водневе охолодження, що зменшує втрати на 30-40%. У цілому втрати у синхронних компенсаторах не перевищують 2-3% від їх номінальної потужності. Промисловість в теперішній час випускає синхронні компенсатори потужністю від 1000 до 80000 кВА на різні напруги і різне число обертів.

7.6.6. Недоліки синхронних двигунів

Як і всяка електромеханічна система, синхронні двигуни володіють як перевагами, так і недоліками. Про переваги синхронних двигунів досить детально вкладено вище.

До недоліків синхронних двигунів в першу сергу слід віднести те, що вони характеризуються відносно складним процесом пуску, а це не дає можливості їх використовувати в електроприводах з частими пусками і зупинками (наприклад, в ліфтах, вантажно-підіймальних механізмах і інших). Синхронні двигуни здатні випадати із синхронізму при перевантаженнях. Абсолютно жорстка характеристика синхронного

двигуна ускладнює можливість регулювання частоти обертання виконавчого механізму. Необхідність одночасного використання при роботі синхронного двигуна змінного і постійного струму обмежують їх застосування в багатьох сферах промислового виробництва.

В процесі експлуатації синхронних двигунів вони вимагають постійного кваліфікованого нагляду і обслуговування. Ось чому синхронні двигуни малих і середніх потужностей на практиці не використовують. Вони широко застосовуються для потужних приводів (100 кВт і більше) механізмів з нечастими пусками, коли необхідно мати незмінну частоту обертів при змінах навантаження, наприклад, ескалатори, компресори, насоси і інші.

7.7. Пожежна небезпека електричних машин та протипожежні заходи

7.7.1. Пожежна небезпека машин змінного струму

В даному підрозділі розглядається пожежна небезпека асинхронних електричних машин загально-промислового призначення, які одержали саме широке використання у всіх галузях промислового виробництва представляють певний інтерес для працівників Державного Пожежного Нагляду.

Сучасні серії асинхронних двигунів загально-промислового призначення А02, 4А, АИ, 5А, 6А. Випускаються електромашинобудівельними заводами конструктивно досить надійними. Але наявність у їх конструкціях горючих матеріалів таких як лаки, гетінакси, текстоліт, дерево, а також здатних до загорання струмоведучих обмоток при відповідних непередбачених режимах можуть нагрівати окремі деталі чи корпус до температури здатної стати джерелом запалювання для навколишнього середовища.

Найбільш вірогідними причинами виникнення пожеж від електричних машин є причини електричного походження: це перевантаження, короткі замикання в обмотках статора двигуна, проводах живлення, а також на затискачах клемної коробки виводів, іскри і дуги на контактних кільцях двигунів з фазним ротором, робота асинхронного двигуна на двох фазах у разі втрати однієї фази через спрацювання запобіжника на одній із трьох фаз, або відсутністю контакту в одній фазі автоматичного вимикача.

Причинами неелектричного походження найчастіше бувають підшипникові щити і самі підшипники котіння в яких обертається вал ротора. Тривале перевищення температурного режиму електричної машини призводить до перегрівання підшипникових щитів і підшипників, мастила, що змащують елементи котіння, розплавляються і витікають. Підшипник, залишившись без мастила, швидко зношується в

результаті виникає несиметрія в повітряному зазорі між статором і ротором, що призводить до задівання ротора об сталь статора, в результаті двигун і обмотки нагріваються до температури, яка стає небезпечною для займання речовин і предметів навколишнього середовища (мастил, ганчірок, інше). Перегрівання підшипникового вузла і задівання ротора об сталь статора через збільшення сил тертя може загальмувати і визвати зупинку ротора, двигун перейде в режим короткого замикання (пусковий режим) і буде споживати із мережі дуже великий пусковий струм. В такому випадку, якщо апарати захисту не відключать двигун із мережі – аварія з пожежо- або вибухонебезпечними наслідками - неминуча.

Причиною перегрівання машини можуть стати: пошкодження або відсутність вентиляторів, сторонні предмети, що потрапили в машину через вентиляційні вікна, забруднення всередині машини пилом, волокнами й іншими частками внаслідок чого погіршується тепловідвід, обмотки машини перегріваються і як наслідок може виникнути заpalення як самих обмоток, так і горючих часток.

7.7.2. Пожежна небезпека машин постійного струму

Як відомо колекторні машини постійного струму конструктивно виконані таким чином, що обмотка якоря машини з'єднується з зовнішнім колом за допомогою ковзного контакту між щітками і колектором. Ковзний контакт при обертанні якоря створює іскріння (проходження струму через повітряний проміжок).

Іскріння – невід'ємне явище при нормальній роботі машини постійного струму, але таке, що не призводить до нагрівання машини вище допустимої норми. Проте, сама наявність іскріння може послужити причиною пожежі, а тому машини постійного струму відносяться до електрооб'єктів з підвищеною пожежною небезпекою.

У процесі експлуатації машин постійного струму часто спостерігається іскріння, що супроводжується підвищеним нагріванням колектора і щіток. Це відбувається через поганий стан щіток, неправильна їх установка, поганий контакт між щітками і їх арматурою, вугільні щітки непідходящої марки і інші. В особливих випадках при перевантаженні машини, при роботі двигуна на обертах вищих за номінальні, при слабкому приляганні щіток до колектору й виникає підсилене іскріння. Повітря в зоні колектора іонізується, що при певних умовах призводить до появи полум'я кругової форми ("круговий вогонь по колектору"), а ще вже небезпечно як для механічної міцності самої машини, так і пожежонебезпечно для навколишнього середовища в якому перебувають горючі матеріали, пил, волокна, хімічні продукти і їх суміші, інші вибохо- і пожежонебезпечні матеріали і речовини.

7.7.3. Протипожежні заходи

Багатогранність виробничих технологічних процесів у різних галузях промисловості свідчить про різноманітність умов, в яких приходиться працювати електричним двигунам (наявність в навколишньому середовищі пилу, газів, вологи, диму, вибухонебезпечної суміші, лужних і кислотних випаровувань й інше).

У залежності від умов до електричних машин повинні висуватися спеціальні вимоги. Через це в першу чергу необхідно забезпечити відповідність конструктивного виконання електричної машини умовам навколишнього середовища в якому буде використовуватися машина.

Приміщення промислових підприємств у залежності від умов зовнішнього середовища, пожежо- і вибухонебезпеки поділяють на відповідні групи і категорії.

За умовами навколишнього середовища виробничі приміщення можуть бути поділені на три групи: нормальні приміщення, небезпечні по корозії приміщення і вибухо-пожежонебезпечні приміщення.

До нормальних приміщень відносяться виробничі приміщення, навколишнє середовище яких не справляє шкідливого впливу на електричні мережі і електрообладнання, а останні в свою чергу не можуть справити якого-небудь шкідливого впливу на приміщення. В цю групу можуть бути віднесені побутові приміщення, адміністративні приміщення, інструментальні, кладові й інші.

До групи небезпечних по корозії відносяться виробничі приміщення, навколишнє середовище яких внаслідок присутності пилу, газів, пару води, кислот, луг і інше, що може руйнувати ізоляцію електричних провідників і електрообладнання.

До групи вибухо-пожежонебезпечних приміщень відносяться приміщення, наявність електропроводки або електрообладнання в середовищі яких є небезпечним для пожежі чи вибуху і в ряді випадків виробничі приміщення можуть бути із середовищем небезпечним як у відношенні корозії, так і в відношенні вибуху і пожежі. За умовами безпеки у відношенні вибуху і пожежі у відповідності з протипожежними нормами.

Будівельним проектуванням промислових підприємств встановлюються категорії приміщень А, Б, В, Г і Д. При цьому категорії А і Б відносяться до вибухонебезпечних, категорія В – до пожежонебезпечних, а категорії Г і Д – до безпечних по вибуху і пожежі. Сучасне виконання електричних машин за ступенем захисту від впливу навколишнього середовища оцінюється захистом обслуговуючого персоналу від зіткнення з струмоведучими або обертовими частинами машин і захист від попадань всередину твердих сторонніх предметів і води.

Прийняті норми захисту електричних машин базуються на буквенно-цифрових позначеннях, що складаються із двох латинських букв

IP від словосполучення "internationalprotection" і від двох цифр. Перша цифра (від 0 до 6) характеризує ступінь захисту персоналу від зіткнення з струмоведучими або обертовими частинами, що знаходяться всередині машини від попадання в неї твердих сторонніх предметів; друга цифра (від 0 до 8) – ступінь захисту від проникнення води всередину машини. Стандартні ступені захисту приведені в таблицях 5.2 і 5.3.

Букви S, M і W використовуються в наступних випадках: S – випробувано на проникнення води, коли електрична машина не працює; M – випробувано на проникнення води, коли електрична машина працює; якщо після букв IP слідує W – електрична машина призначена для використання в особливих кліматичних умовах при здійсненні додаткових заходів захисту.

Якщо у виконанні ступеня захисту допущені відхилення від ГОСТ, то букви IP не ставляться, а над цифрою, що позначає ступінь захисту з відхиленням, ставиться індекс «'», наприклад 2'3.

Таблиця 7.2.

Ступені захисту обслуговуючого персоналу від зіткнення з струмоведучими і обертовими частинами електричних машин і від попадання твердих предметів всередину корпусу

Перша цифра умовного позначення	Ступені захисту
0	Спеціальний захист відсутній
1	Захист від проникнення всередину корпусу тіл, розміром більше 52,5мм
2	Захист від проникнення всередину корпусу великої ділянки людського тіла, наприклад руки, і від проникнення твердих предметів розміром більше 12,5мм
3	Захист від проникнення всередину корпусу пальців або предметів довжиною не більше 80мм і від проникнення твердих предметів розміром більше 2,5мм
4	Захист від проникнення всередину корпусу проволочки або інших предметів, товщина яких перевищує 1мм
5	Захист від проникнення всередину корпусу пилу в кількості, достатньої для порушення нормальної роботи
6	Повний захист від проникнення всередину корпусу пилу

Таблиця 7.3.

Ступені захисту електричних машин від проникнення води

Перша цифра умовного позначення	Ступінь захисту
0	Захист відсутній
1	Захист від крапель води: вертикально-падаючі на корпус краплі не повинні чинити шкідливої дії
2	Захист від крапель води при нахиленні корпусу до 15° ; не повинні чинити шкідливої дії при нахилі його оболонки на будь який кут до 15° відносно нормального положення
3	Захист від дощу; дощ, падаючи на корпус під кутом 60° по вертикалі, не повинен чинити шкідливої дії
4	Захист від бризок: вода, що розбризкується на корпус в будь-якими напрямку на корпус, не повинна чинити шкідливої дії
5	Захист від водяних струменів: струменів води, що викидається в будь-якому напрямку на корпус, не повинні попадати у середину корпусу в кількості, достатньої для пошкодження
6	Захист від хвиль води: вода при хвилюванні не повинна попадати у середину корпусу в кількості, достатній для пошкодження
7	Захист при зануренні у воду: вода не повинна проникати в корпус, занурений в воду, при відповідних умовах тиску и часу в кількості, достатній для пошкодження
8	Захист при довготривалому зануренні в воду: електричні машини придатні для довготривалого занурення в воду за умов, встановлених виробником

У теперішній час промисловістю виробляються електричні машини загальнопромислового призначення в залежності від ступеня захисту, слідуєчих видів:

Захищені електродвигуни – включають випадкове доторкання до рухомих і струмопровідних частин і від попадання всередину сторонніх предметів, бризок та крапель води, які падають під кутом 45° . Вони мають вільний прохід повітря до обмоток і спроможні працювати тільки з горизонтальним розташуванням вала. Система вентиляції двостороння радіальна. До них відносяться електродвигуни серії А, 4А.

Закриті обдувні – електродвигуни у яких внутрішні частини відокремлені від навколишнього середовища оболонкою, яка захищає їх від проникнення всередину сторонніх дрібних предметів і бризків води з будь-якого напрямку. На кінці валу машини, зовні її корпусу, зі сторони протилежної приводу, розміщений і захищений кришкою, вентилятор, який обдуває (охолоджує) ребристий корпус машини. Це такі електродвигуни АО, А02, АОЛ2, 4АМ, АОЗ, Ра й інші.

На рисунку 7.45 показані ці два види асинхронних двигунів

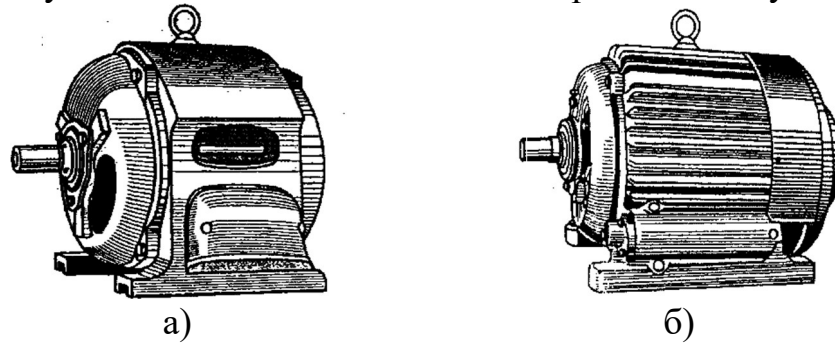


Рис.7.45. Асинхронні електродвигуни захищеного (а) і закритого обдувного (б) виконання

Таблиця 7.4.

Ступені захисту електрообладнань

Назва	Сутність	Відповідні позначення в системі ІР
Відкрите	Немає захисту від доторкання до його рухомих і струмонесучих частин та від проникнення всередину сторонніх предметів	Від ІР-00 до ІР-20
Захищене (пило-крапле-бризко-захищене)	Є спеціальні пристосування для захисту від випадкового проникнення всередину сторонніх тіл, рідин, пилу	Від ІР-31 до ІР-44
Закрите (тобто пиловологонепроникне, ущільнене)	Сполучення між серединою апарату та навколишнім середовищем можливе лише крізь нещільності в місцях з'єднань між частинами оболонки	Від ІР-54 до ІР-68

Надійна робота електричної машини можлива, якщо вона має спроможність протистояти впливу факторів зовнішнього середовища і використовується в умовах, для яких вона призначена.

Пожежонебезпечною зоною називається простір всередині і зовні приміщень, в межах якого постійно або періодично обертаються горючі (спалімі) речовини і матеріали, в якому вони можуть знаходитися як при

нормальному технологічному процесі, так і при його порушеннях. Згідно Правил будови електроустановок [5] пожежонебезпечні зони класифікують слідуочим чином:

1. Пожежонебезпечна зона класу П-I – простір у приміщенні, у якому знаходиться горюча рідина, яка має температуру спалаху більше +61°C.

2. Пожежонебезпечна зона класу П-II – простір у приміщенні; у якому можуть накопичуватися, виділятися горючий пил і волокна.

3. Пожежонебезпечна зона класу П-IIa – простір у приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали.

4. Пожежонебезпечна зона класу П-III – простір поза приміщенням, в якому знаходяться горюча рідина, яка має температуру спалаху понад +61°C або тверді горючі речовини.

У пожежонебезпечних зонах будь-якого класу можуть застосовуватися електричні машини напругою до 10кВ за умови, що їхня оболонка має ступінь захисту не менший ніж зазначений у таблиці 5.5[5].

Таблиця 7.5.

Мінімальний ступінь захисту оболонок електричних машин у залежності від класу пожежонебезпечної зони

Вид установок та умови роботи	Ступінь захисту оболонок пожежонебезпечних зон класу			
	П-I	П-II	П-IIa	П-III
Установки стаціонарні, які іскрять або мають частини, що іскрять за умовами роботи (асинхронні двигуни з фазовим ротором, машини постійного струму колекторні машини змінного струму й інші, що мають ковзний контакт).	IP-44	IP-54	IP-44	IP-44
Установки стаціонарні, які не іскрять і не мають частин, що іскрять за умовами роботи (асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, виконавчі асинхронні двигуни).	IP-44	IP-44	IP-44	IP-44
Установки на пересувних механізмах, які іскрять або не іскрять за умовами роботи.	IP-44	IP-54	IP-44	IP-44

Електрообладнання переносного електрифікованого інструменту в пожежонебезпечних зонах будь-якого класу повинно мати ступінь захисту оболонки не менше IP-44.

Електричні машини з частинами, що нормально іскрять за умовами роботи (наприклад – електродвигуни з контактними кільцями), повинні розміщуватися на відстані не менше їм від місця розташування горючих речовин або відгороджуватися від них екраном з негорючих матеріалів.

Для механізмів, що встановлюються в пожежонебезпечних зонах, допускається застосування електродвигунів з меншим ступенем захисту оболонки ніж зазначені в таблиці 5.5 за таких умов:

електродвигуни повинні встановлюватися за межами пожежонебезпечних зон;

привод механізму повинен здійснюватися за допомогою вала, пропущеного крізь стіну, з улаштуванням у стіні сальникового ущільнення. Важливим заходом запобігання виникнення пожежі від електричних машин, при їх експлуатації, є надійний захист електричної машини від непередбачених аварійних режимів – коротких замикань і перевантажень.

Основними апаратами захисту в теперішній час є: плавкі запобіжники (плавкі вставки) та автоматичні запобіжники (автоматичні вимикачі).

Плавкими вставками машини захищаються від коротких замикань в мережі живлення двигуна та всередині обмоток статора. Плавкі вставки запобіжників повинні бути каліброваними з вказівкою номінального струму вставки (вказується на вставці, якщо вона змінна, або на корпусі, якщо вона незмінна). Використовувати некалібровані вставки так звані «жучки», без маркіровки величини струму – ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ.

Більш досконаліми і надійними апаратами захисту багатократної дії є автоматичні вимикачі. За допомогою автоматичних вимикачів здійснюється миттєвий захист електродвигуна від коротких замикань за рахунок електромагнітного розчіплювача, а від перевантажень за рахунок теплового розчіплювача.

Коли електричний двигун комутується магнітним пускачем, то він захищається від перевантажень тепловими реле, якими комплектується електромагнітний пускач в одному корпусі. (Про запобіжники, автоматичні вимикачі та теплові реле більш докладно дивись Розділ 8).

З метою попередження пожеж та підвищення надійності електричних машин і іншого електрообладнання на промислових підприємствах існує система планово-попереджувальних ремонтів (ППР).

Система ППР утримує спеціальну експлуатаційну документацію:

- місячні та кварталні плани-графіки ревізії та ремонту електрообладнання;
- план-графік щоденного огляду та поточного ремонту;
- журнал огляду електрообладнання, в який заноситься все те, що виявлено і усунуто;
- паспорт-карта на кожний двигун, в якому відмічаються всі переміщення по даному підприємству та ремонти;
- акти на аварії та раптових зупинках електродвигунів в яких відмічаються причини аварії і робляться відповідні висновки.

Ведення такої технічної документації допомагає електротехнічному персоналу підтримувати електрообладнання в належному технічному

стані, а також прогнозувати та попереджувати можливість виникнення пожежеонебезпечних проявів від електрообладнання.

Важливим заходом попередження пожежі від електричних машин є вимірювання опору ізоляції струмоведучих частин. Перевірка опору ізоляції проводиться при введенні в дію електричної машини і повторному її вмиканні в мережу, а також при поточних і капітальних ремонтах електрообладнання в терміни, визначені керівником енергослужби підприємства. Профілактичні випробування ізоляції струмоведучих частин виконується за допомогою мегаомметра: у електродвигунів напругою до 660В включно – на напругу мегаомметра на 100В, а у електродвигунів напругою вище 660В – на напругу 2500В. Опір ізоляції повинен бути не менше 0,5МОм.

Питання та завдання для самоконтролю.

1. Призначення електричних машин, принцип роботи електромеханічного перетворювача.
2. За якими ознаками класифікують сучасні електричні машини.
3. Які типи електричних машин постійного струму ви знаєте та їх практичне використання?
4. Накресліть зовнішню характеристику генератора постійного струму з паралельним збудженням та поясніть її практичне значення.
5. Поясніть, чому генератор постійного струму з паралельним збудженням не зможе працювати при неправильному приєднанні обмотки збудження до якоря?
6. Для чого в коло якоря при пуску двигуна постійного струму необхідно включати додатковий пусковий опір? Як визначити величину опору пускового реостату?
7. Поясніть за допомогою формул, залежність струму I_d , що споживає двигун, від моменту навантаження на валу двигуна.
8. Якими способами можна регулювати швидкість обертання двигунів постійного струму?
9. Конструктивні та електромеханічні властивості машин змінного струму. Які типи машин ви знаєте?
10. Охарактеризуйте переваги і недоліки асинхронних двигунів з короткозамкненим та фазним ротором.
11. Поясніть утворення обертового магнітного поля обмотки статора трифазних двигунів змінного струму.
12. Накресліть вид механічної та електромеханічної характеристик асинхронного двигуна. Яке практичне значення вони мають?
13. Методи побудови механічних та електромеханічних характеристик асинхронного двигуна. Приведіть приклад.
14. Поясніть реакцію асинхронного двигуна, працюючого з номінальним навантаженням, на зниження напруги живлення на 20% від номінального значення.

РОЗДІЛ 8. ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ ВИРОБНИЧИХ МЕХАНІЗМІВ

8.1. Коротко про історію розвитку електроприводу

Електричний привод на сьогодні є основою електрифікації та автоматизації робочих машин, механізмів і технологічних процесів у всіх галузях виробництва. Значення електроприводів в житті й діяльності сучасного суспільства важко переоцінити, оскільки він чинить істотний вплив на темпи соціального і технічного прогресу.

Історія розроблення і створення першого електропривода належить вченому академіку Б.С.Якобі. В 1838 р. Б.С.Якобі вперше на практиці встановив винайдений ним електродвигун постійного струму на човні і, з'єднавши вал електродвигуна із гребним гвинтом, збудував перший в історії електрохід. Він рухався як за течією річки так і проти неї, розвиваючи швидкість до 5 км/год. з 12 пасажирами на борту. Джерелом живлення електродвигуна була гальванічна батарея сухих елементів. Проте електропривод, створений Б.С.Якобі, на той час не одержав розповсюдження через високу вартість, недосконалість та малу ємність сухих батарей. Подальший розвиток електроприводу був пов'язаний із розробкою і появою електричних генераторів необхідної потужності.

Надалі розвитку електроприводу сприяв розвиток міського електротранспорту. У 1892 р. був пущений трамвай у Києві.

Всі описані електроприводи були електроприводами постійного струму.

Справжня революція в розвитку і широкому застосуванні електричного приводу відбулася після того, як у 1889-1891 рр. інженер-електрик М.О.Доліво-Добровольський розробив і впровадив у виробництво трифазний змінний струм, в тому числі розробив конструкції асинхронних двигунів із фазним і короткозамкненими роторами. Прості за конструкцією і надійні в експлуатації асинхронні двигуни створили необхідні умови для широкого розвитку електроприводу змінного струму.

Електропривод змінного струму поступово почав витісняти інші види приводів (паровий-трансмісійний, привід від двигуна на нафтовому паливі і навіть приводи постійного струму та ін.). На сьогодні електропривід змінного струму зайняв домінуюче місце у всіх галузях промислового виробництва (див. також розділ 5, п. 5.4.1 і 5.4.2.).

У 1880 р. Д.А.Лачінов опублікував наукову працю «Электромеханическая работа», яка стала основою для розробки теорії.

Д.А.Лачінов провів дослідження ККД електричних машин, класифікував їх за системами збудження, одержав вирази для механічних характеристик електродвигунів постійного струму, розробив питання

живлення електродвигуна від автономного генератора, показав переваги електроприводу, що розвивався.

Першим підручником з теорії електроприводу був підручник С.А.Рінкевича «Электрическое распределение механической энергии» (1925 р.). Ця праця С.А Рінкевича визначила теорію електроприводу в сучасному його розумінні.

Подальший розвиток теорії електроприводу відображений у працях таких вчених: В.К.Попова, В.П.Андрєєва, Ю.А.Сабініна, Л.Б.Гейлера, М.Г.Чілікіна, А.С.Сандлера і багатьох інших.

Період із 1961 р. по теперішній час характеризується подальшим розвитком теорії електроприводу та автоматизованих систем управління на основі широкого використання обчислювальної техніки, напівпровідникової та мікропроцесорної техніки і досягнень інших суміжних наук.

В останні роки з'явилося немало опублікованих підручників, наукових та прикладних праць [23,24,25,26,27,28], які показують, що науковий і практичний інтерес до теорії та практики використання й удосконалення електроприводів не втрачає своєї актуальності й на сьогоднішній день.

Великий вклад у розвиток сучасного автоматизованого електроприводу внесли німецькі фірми AEG (Allgemeine Elektrische Gesellschaft), на якій у свій час працював і творив М.О.Доліво-Добровольський, і Siemens, які й на сьогодні є провідними фірмами у світі з виробництва новітніх систем автоматизованих електроприводів на змінному та постійному струмах.

8.2. Загальні питання електричного приводу

Електричним приводом (ЕП), або скорочено електроприводом називається електромеханічна система (сукупність елементів), що складається із електродвигуна, передавального механізму, апаратів захисту і керування, призначених забезпечити перетворення електричної енергії на механічну, приведення в рух виконавчих органів робочої машини та, при необхідності, керування цим рухом.

Залежно від призначення виконавчих механізмів, їх конструктивного виконання і способу передачі енергії електричні приводи можна розділити на три види: поодинокий, груповий і багатодвигунний електропривод.

При груповому електроприводі декілька робочих механізмів або машин за допомогою відповідної системи передачі приводяться в дію від одного і того ж двигуна. Іншими словами, рух від одного двигуна за допомогою відповідних пристроїв передається одночасно декільком механізмам і машинам.

Для цього типу приводу використовується трансмісійне передавання. Внаслідок того, що електродвигун у груповому приводі не пов'язаний безпосередньо з виробничим механізмом, цей привод, як правило, є громіздким, малоефективним і через це в сучасних виробничих умовах практично не використовується.

Різноманітні типи двигунів, що випускає промисловість, а також їх конструктивне виконання (фланцеві, вбудовані, багатошвидкісні та інші) дозволяють перейти до поодинокого і багатодвигунного ЕП.

За поодиноким електроприводом кожна робоча машина приводиться в рух окремим, пов'язаним тільки з цією машиною, електродвигуном. Використання поодинокого електропривода дозволяє одержати більш удосконалену систему передачі електроенергії від джерела живлення до виконавчого органу робочої машини. При цьому не тільки виникають сприятливі умови для вибору типу електродвигуна, що повністю відповідає умовам роботи виробничого механізму, але і утворюються сприятливі умови для часткової або повної автоматизації виробничого процесу, максимального зближення приводу з машиною і його спрощення.

На рис.8.1 приведена структурна схема поодинокого ЕП.

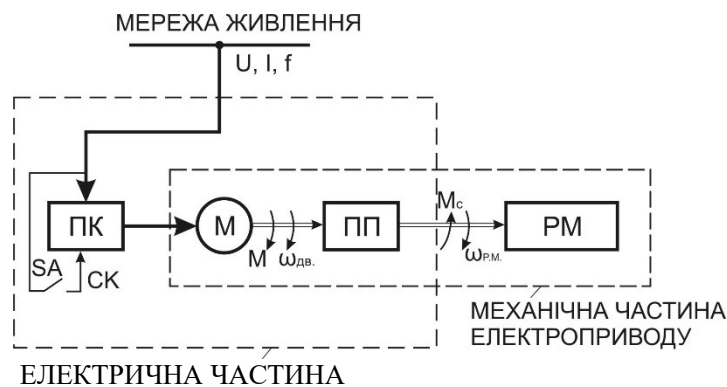


Рис. 8.1. Структурна схема поодинокого електроприводу

Основним елементом ЕП (Рис.8.1) є електричний двигун **М**, який забезпечує безпосереднє перетворення електричної енергії в механічну. На рисунку потоки електричної енергії показані одиночними лініями, а потоки механічної енергії – подвійними, тонкою лінією показано малопотужне коло керування.

ПК – пристрій керування. У найпростішому випадку функції ПК в ЕП виконує різного роду комутаційна апаратура: контактори, магнітні пускачі, тиристорні комутатори. В більш складних системах ЕП це можуть бути керовані напівпровідникові перетворювачі: випрямлячі, регулятори напруги, перетворювачі частоти, імпульсні регулятори та інші. Приведення в дію ПК відбувається подачею сигналу керування (СК) через контакт SA.

У найпростішому випадку цю функцію виконує кнопка управління «пуск» – чорного кольору, «стоп» – червоного кольору. В сучасних автоматизованих електроприводах високого рівня в склад ПК включають мікропроцесорні засоби, мікро- і мініЕОМ.

ПП – передавальний пристрій, який механічну енергію електродвигуна М перетворює у вид, необхідний для споживача механічної енергії. Споживачі механічної енергії – це виконавчі органи робочих машин (РМ) і механізмів різних технологічних установок. В якості ПП в ЕП використовують муфти, шківоремінні й ланцюгові передачі, редуктори. За основним функціональним призначенням ПП подібний до ПК з тією лише різницею, що ПК перетворює електричну енергію, а ПП – механічну (див. рис.8.1 – механічна частина електроприводу). Механічна частина електроприводу складається із обертальної частини двигуна (ротора, якоря), ПП і виконавчого органу робочої машини (РМ).

Електрообладнання і апаратура, що входять в систему електроприводу в цілому, можуть бути розташовані як у самому виконавчому органі (установці), так і зовні цього механізму. В багатьох випадках використовують комбінований спосіб розміщення.

Останнім часом велике поширення одержав так званий багатодвигунний електропривод, що складається з декількох електродвигунів, кожний із яких призначений для приводу окремих робочих органів виробничої машини. Система багатодвигунного приводу в багатьох випадках являє собою декілька механічно не пов'язаних між собою поодиноких приводів. Внаслідок цього багатодвигунний електропривод, маючи переваги, властиві поодинокому приводу, дозволяє повністю виключити механічний розподіл енергії між окремими робочими органами виробничого механізму з властивими їй недоліками.

Не дивлячись на принципову різницю робочих механізмів і машин в технологічному відношенні, в питаннях електромеханіки існує значна схожість.

Навантаження на вал двигуна в системі електроприводу складається із статичного M_c і динамічного $M_{дин.}$ моментів. Статичний момент обумовлений моментами опору обертанню вала (сила різання, тертя, ваги, тощо) (див. рис.8.1). Динамічний момент ($M_{дин.}$) виникає при переході системи із одного стану в інший, наприклад, при зміні обертів рухомих частин приводу через поточну зміну навантаження (моменту опору) M_c .

Рух будь-якого елемента механічної частини ЕП підпорядковується відомим із курсу фізики законам механіки.

Обертальний рух елемента характеризується такими основними залежностями:

$$\text{рівнянням руху} \quad \Sigma M = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \quad (8.1)$$

$$\text{рівнянням потужністю} \quad P = M\omega, \quad (8.2)$$

$$\text{рівнянням енергією руху} \quad W = J \cdot \frac{\omega^2}{2} \quad (8.3)$$

де ΣM – сукупність моментів, які впливають на елемент; J – момент інерції елемента відносно осі обертання; t – час; ω – кутова швидкість; $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$ – кутове прискорення.

Рівняння (8.1) за своїм характером є диференціальним, оскільки утримує похідні швидкості й моменти інерції. В більшості випадків момент інерції елементів під час руху не змінюється і його похідна дорівнює нулю і рівняння (8.1) спрощується

$$\Sigma M = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon, \text{ тобто } \varepsilon = \frac{\Sigma M}{J}. \quad (8.4)$$

Рівняння (8.4) відображає відомий закон механіки: прискорення руху механічного елемента (тіла) пропорційне алгебраїчній сумі діючих на нього моментів (сил) і обернено пропорційне його моменту інерції (масі).

Якщо $d\omega/dt = 0$, то $\Sigma M = 0$, іншими словами, елемент буде рухатися з незмінною швидкістю (або знаходиться у стані спокою, що є частковим випадком руху з нульовою швидкістю), якщо сума моментів, до нього прикладених, буде дорівнювати нулю. Такий рух називається усталеним.

При $\Sigma M > 0$ елемент буде рухатися з прискоренням, а при $\Sigma M < 0$ – зі сповільненням.

Ліва частина рівняння (8.4) являє собою різницю моментів електродвигуна і статичного моменту опору навантаження M_c , тобто

$$M - M_c = J \Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (8.5)$$

ця різниця визначає умови прискорення чи сповільнення руху, в теорії електропривода вона одержала назву динамічного моменту, а в цілому рівняння (8.5) називається рівнянням руху електропривода.

$$M - M_c = M_{\text{дин}} = J \Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (8.6)$$

Рівняння (7.6) показує, що обертальний момент M , який розвиває двигун, врівноважується моментом опору M_c на його валу та інерційним, або динамічним моментом $J \frac{d\omega}{dt}$.

Напрямок дії динамічного моменту завжди відповідає напрямку прискорення електропривода. Тому, залежно від знака $M_{\text{дин}}$, мають місце такі режими роботи електропривода:

1. $M_{\text{дин}} > 0$; $\frac{d\omega}{dt} > 0$ – розганяння при $\omega > 0$ і гальмування при $\omega < 0$;

2. $M_{дин} < 0$; $\frac{d\omega}{dt} < 0$ – гальмування при $\omega > 0$ і розганяння при $\omega < 0$;
3. $M_{дин} = 0$; $\frac{d\omega}{dt} = 0$ – режим усталеного руху при $\omega = const$.

Величина і знак динамічного моменту залежить від співвідношення величин діючих в системі рушійних і гальмівних моментів та сил. При цьому при передачі потужності від двигуна до виконавчого органу машини момент двигуна рушійний і має той самий напрямок, що і швидкість. У гальмівному режимі момент двигуна має знак, протилежний знаку швидкості.

Момент інерції J , що входить до складу динамічного моменту, можна одержати множенням окремих елементів (тіл) маси на квадрат відстані від вісі обертання з послідуочим підсумком вказаних добутоків:

$$J = \sum_{k=1}^n m_k r_k^2 \quad (8.7)$$

де r_k – відстань від вісі обертання k -го елемента маси m_k ;

Підсумок переходить в інтегрування, якщо аналітично відома функція радіального розподілу маси $J = \int_m r^2 dm$

При постійному значенні m момент інерції елемента (тіла) відносно вісі дорівнює добутку маси тіла на квадрат радіуса інерції тіла відносно цієї вісі:

$$J = m r_{ін}^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (8.8)$$

із формули 8.8 маємо $r_{ін} = \sqrt{\frac{J}{m}}$ – радіус інерції тіла (елемента).

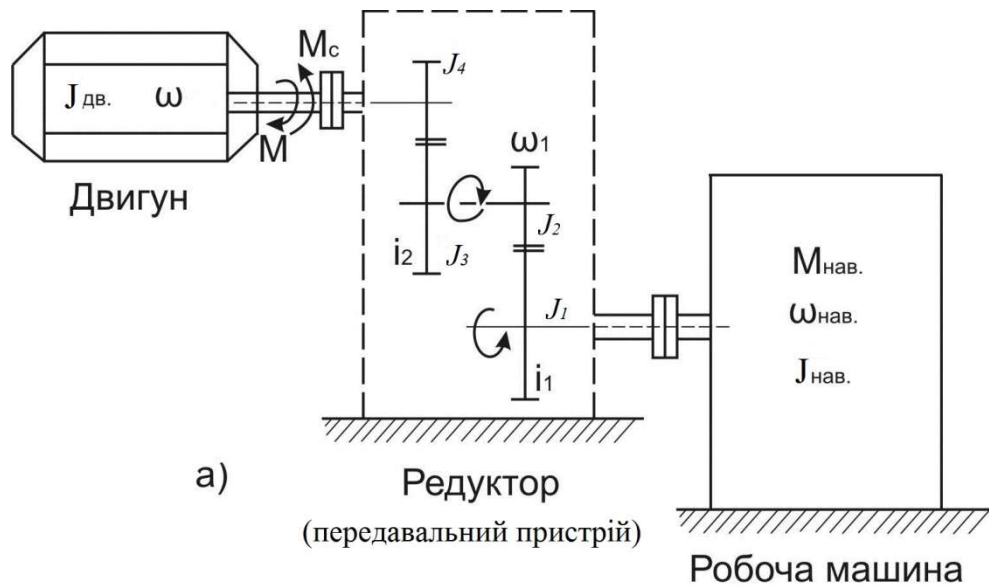
Радіуси інерції тіл різної форми, в тому числі й роторів та якорів двигунів, приводяться в каталогах та довідниках щодо електричних машин.

Розмірність моменту інерції у міжнародній системі одиниць СІ:

$$I = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с}^2 = \text{Вт} \cdot \text{с}^3 \quad (8.9)$$

Звичайно виробничі механізми з'єднують з двигуном через проміжні передачі. Найчастіше між високошвидкісним двигуном та низькошвидкісною робочою машиною є передавальний механізм – редуктор, призначенням якого є зменшення кутових швидкостей і відповідно збільшення обертових моментів.

На рис.8.2 зображена кінематична схема механічної частини електроприводу та її одномасова модель.



**Рис. 8.2. а) – кінематична схема механічної частини електропривода;
б) – одномасова модель**

Для аналізу поведінки ЕП як механічної системи необхідно всі статичні моменти і сили навантаження, а також всі моменти, діючі в реальній системі електроприводу, звести до базової кутової швидкості, в якості якої, як правило, приймають кутову швидкість вала електродвигуна (ротора).

З цією метою реальні елементи ЕП (рис.8.2, а) з достатнім ступенем точності можуть бути представлені у вигляді жорсткої одномасової механічної системи зі зведеним статичним моментом навантаження $M_{с.зв}$ і зведеним моментом інерції J , кутова швидкість якої відповідає кутовій швидкості вала електродвигуна ω (рис.8.2, б).

Зведення навантажувального (статичного) моменту опору до валу двигуна. Його виконують на підрунті розгляду енергетичного балансу для механічної частини ЕП (передавальна потужність на будь-якому валу кінематичної схеми залишається незмінною), що призводить до рівності потужностей одномасової і реальної системи в усталеному режимі, при якому обертальний момент двигуна урівноважується моментом статичного опору $M=M_{с.зв}$ (див. рис.8.2, б).

Якщо зведений статичний момент опору $M_{С.ЗВ}$ позначимо через $M'_{нав}$, а втрати у приводі не враховуємо, то одержимо:

$$M_{нав} \cdot \omega_{нав} = M'_{нав} \cdot \omega,$$

звідки

$$M'_{нав} = M_{нав} \frac{\omega_{нав}}{\omega} = M_{нав} \frac{1}{i}. \quad (8.10)$$

i – сумарне передаточне число; при позначеннях рис.8.2, а

$$i = \frac{\omega}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{нав}} = i_1 \cdot i_2.$$

Втрати в механічній частині привода можна враховувати через ККД, то з урахування втрат одержимо:

$$\text{в руховому режимі} \quad M'_{нав} = M_{нав} / i \cdot \eta, \quad (8.11)$$

$$\text{а в режимі гальмування} \quad M'_{нав} = M_{нав} \cdot \eta / i. \quad (8.12)$$

ККД привода є функцією зведеного моменту. Його значення для ряду приводів за номінальним моментом в середньому можуть бути такими:

на пару		
коліщат	у випадку циліндричних коліщат	0,94-0,98
	у випадку конічних коліщат	0,9-0,95
	при плоскоремінних та	0,96-0,98
	клинчаторемінних передачах	
	при самозапірній черв'ячній передачі	0,4-0,45

Зведення моментів інерції до валу двигуна проводиться за умови незмінності запасу кінетичної енергії (див. формулу 8.3). З позначеннями рис.8.2, а, наприклад, зведення моменту інерції робочої машини без урахування втрат у приводі виконується за виразом

$$\frac{1}{2} J'_{нав} \omega_{дв}^2 = \frac{1}{2} J_{нав} \omega_{нав}^2, \quad (8.13)$$

звідки

$$J'_{нав} = J_{нав} / i^2.$$

Втрати у приводі і тут враховуються через ККД:

$$\text{в руховому режимі} \quad J'_{нав} = J_{нав} \eta / i^2 \quad (8.14)$$

$$\text{в режимі гальмування} \quad J'_{нав} = J_{нав} / \eta i^2 \quad (8.15)$$

У сумарному моменті інерції окрім особистого моменту інерції двигуна утримуються також і зведені значення моменту інерції робочої машини та окремих елементів редуктора (передавального механізму). Якщо суму зведених значень моменту інерції елементів редуктора і робочої машини позначити через $J_{зв}$, а ротора $J_{рот.}$, то повний момент інерції привода буде

$$J = J_{зв} + J_{рот.} \quad (8.16)$$

Задача 8.1. Асинхронний двигун через редуктор приводить в дію робочу машину. Двигун характеризується такими даними:

$$P_{НОМ} = 3 \text{ кВт}; U_{НОМ} = 380 \text{ В}; n_0 = 750 \frac{\text{об}}{\text{хв}};$$

$$S_{НОМ} = 5,8\%; \eta_{НОМ} = 79,5\%; J_{rot} = 250 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{с}^3;$$

$$\lambda_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{НОМ}} = 1,9; \lambda_{KP} = \frac{M_{KP}}{M_{НОМ}} = 2,2; \frac{I_{\Pi}}{I_{НОМ}} = 5,0.$$

Дані робочої машини:

$$M_{нав.} = 192 \text{ Н} \cdot \text{м}; n_{нав.} = 125 \frac{\text{об}}{\text{хв}}; J_{нав.} = 0,635 \text{ Вт} \cdot \text{с}^3; J_{ред.} = 94 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{с}^3;$$

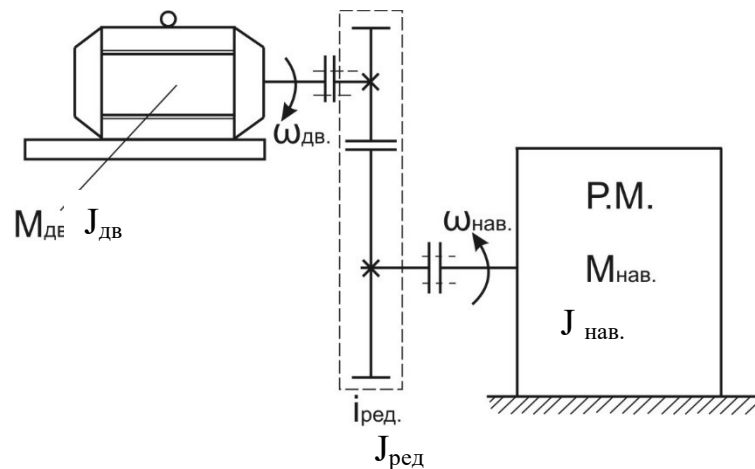
$$J_{ред.} = 94 \cdot 10^{-4} \cdot \eta_{ред.} = 87\%.$$

Показати кінематичну схему привода і визначити:

1. Потужність, що споживає робоча машина P_{PM} ;
2. Потужність, яку розвиває двигун $P_{дв}$, частоту обертання $\omega_{дв}$, момент $M_{дв}$ при заданому навантаженні;
3. Передаточне число i ;
4. Сумарний момент інерції системи, зведений до вала двигуна J'_{Σ} у рушійному та гальмівному режимах;
5. Зведене значення моменту навантаження $M'_{нав.}$ до вала двигуна у рушійному та гальмівному режимах;
6. Тривалість часу запускання двигуна без навантаження (холостий хід) $t_{п.хх}$, та тривалість часу за пускання з навантаженням $t_{п.нав.}$, тривалість часу гальмування $t_{г}$ до повної зупинки привода при вимиканні двигуна із мережі живлення.

Розв'язання.

Кінематична схема привода має вигляд.



1. Потужність, що споживає робоча машина.

$$P_{PM} = M_{нав.} \cdot \omega_{нав.} = 192 \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = 192 \frac{2\pi \cdot 125}{60} = 2512 \text{ Вт} \approx 2,5 \text{ кВт}.$$

2. Потужність, що утворюється на валу двигуна P_2 при роботі з навантаженням робочою машиною,

$$P_2 = \frac{P_{PM}}{\eta_{ред.}} = \frac{2,5}{0,87} = 2,87 \text{ кВт}.$$

3. З яким ковзанням буде обертатися ротор двигуна при наявності величини потужності на валу P_2 . Для цього скористаємося лінійною залежністю між ковзанням і потужністю асинхронного двигуна:

$$\frac{P_2}{P_{НОМ}} = \frac{S}{S_{НОМ}}, \text{ за умовою задачі } S_{НОМ} = 0,058. \text{ Тоді}$$

$$S = \frac{P_2}{P_{НОМ}} \cdot S_{НОМ} = \frac{2,87}{3} \cdot 0,058 = 0,055.$$

4. Кутова швидкість обертання вала двигуна

$$\omega_{дв} = \omega_0(1 - S) = 78,5(1 - 0,055) = 74,18 \approx 74 \text{ рад/с},$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с}.$$

5. Обертальний (рушійний) момент, що утворюється на валу двигуна при його навантаженні робочою машиною

$$M_{дв} = \frac{P_2}{\omega} = \frac{2,87 \cdot 10^3}{74} = 38,8 \text{ Нм}.$$

6. Передаточне число i

$$i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_{нав.}} = \frac{74}{13} = 5,7,$$

$$\text{де } \omega_{нав.} = \frac{\pi \cdot n_{нав.}}{30} = \frac{\pi \cdot 125}{30} = 13 \text{ рад/с}.$$

7. Сумарний момент інерції у рушійному режимі:

$$J'_{\Sigma p} = J_{дв} + J_{ред} + J_{нав}$$

$$\cdot \frac{1}{\eta_{ред.} i^2} = 0,025 + 0,0094 + 0,635 \frac{1}{0,87 \cdot 5,7^2} = 571 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{с}^3$$

Сумарний момент інерції у гальмівному режимі

$$J'_{\Sigma z} = J_{дв} + J_{ред} + J_{нав}$$

$$\cdot \frac{\eta_{ред.}}{i^2} = 0,025 + 0,0094 + 0,635 \frac{0,87}{5,7^2} = 516 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{с}^3$$

8. Приведене значення моменту навантаження у рушійному режимі:

$$M'_{np.p} = \frac{M_{нав.}}{i \cdot \eta_{ред.}} = \frac{192}{5,7 \cdot 0,87} = 38,7 \text{ Нм},$$

таким чином $M'_{np.p} = 38,7 = M_{\text{ог}} = 38,7 \text{ Нм}$ (див. п.5), електромеханічна система урівноважена і двигун буде працювати у номінальному режимі.

Приведене значення моменту навантаження у гальмівному режимі:

$$M'_{np.z} = \frac{M_{нав.} \cdot \eta_{ред.}}{i} = \frac{192 \cdot 0,87}{5,7} = 29,3 \text{ Нм}$$

9. Тривалість часу запускання двигуна без навантаження $t_{п.хх}$, коли $M_{нав.} = 0$.

$$t_{п.хх} = \frac{I'_{\Sigma p} \cdot \omega_0}{4 \cdot M_{KP} S_{KP}} = \frac{571 \cdot 10^{-4} \cdot 78,5}{4 \cdot 89 \cdot 0,24} = 0,05 \text{ с},$$

де M_{KP} – критичний момент асинхронного двигуна, за умовою задачі

$$M_{KP} = 2,2 M_{НОМ} = 2,2 \cdot 40,6 = 89 \text{ Нм}$$

$M_{НОМ}$ – номінальне значення моменту асинхронного двигуна

$$M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \frac{3 \cdot 10^3}{73,9} = 40,6 \text{ Нм}$$

$\omega_{НОМ}$ – номінальне значення кутової швидкості двигуна

$$\omega_{НОМ} = \omega_0 (1 - S_{НОМ}) = 78,5 (1 - 0,058) = 73,9 \text{ рад/с}$$

S_{KP} – критичне значення ковзання асинхронного двигуна

$$S_{KP} = S_{НОМ} (\lambda_{KP} + \sqrt{\lambda_{KP}^2 - 1}) = 0,058 (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,24.$$

10. Тривалість часу запускання двигуна з навантаженням робочою машиною.

$$t_{n.нав.} = \frac{I'_{\Sigma p} \cdot \omega}{M_{n.сп.} - M'_{np.пух.}} = \frac{571 \cdot 10^{-4} \cdot 74,18}{83 - 38,7} = 0,1 \text{ с}$$

$$\text{де } M_{n.сп.} = \frac{M_{KP} + M_{II}}{2} = \frac{89 + 77}{2} = 83 \text{ Нм}$$

M_{II} – пусковий момент двигуна за умовою задачі $M_{II} = 1,9 M_{НОМ} = 1,9 \cdot 40,6 = 77 \text{ Нм}$.

11. Тривалість часу гальмування двигуна до повної зупинки при вимиканні його із мережі живлення

$$t_z = \frac{I'_{\Sigma z} \cdot \omega}{0,9 M_{n.сп.} + M'_{np.z}} = \frac{516 \cdot 10^{-4} \cdot 74,18}{0,9 \cdot 83 + 29,3} = 0,035 \text{ с}.$$

8.3. Нагрівання і розрахунок потужності двигуна електропривода

8.3.1. Навантаження і навантажувальні режими двигунів електропривода

Розрахунок потужності і вибір двигуна в системі електропривода визначаються конкретними технологічними потребами виробничого процесу або установки. Багатогранність технологічних особливостей, які характеризуються різним навантаженням, тривалістю виробничого циклу, співвідношенням часу роботи і пауз в межах циклу, умовами охолодження і нагрівання, величиною і характером зміни навантаження під час роботи ЕП, специфікою пуску і зміною швидкості та деякими іншими особливостями обумовили необхідність введення восьми стандартизованих навантажувальних режимів роботи двигунів ЕП, умовне позначення яких проставляється на паспортному щитку електродвигуна: $S1, S2, \dots, S8$.

Із них головні режими: $S1$ – тривалий, $S2$ – короткочасний, $S3$ – повторно-короткочасний і $S6$ – переміжний; додаткові режими $S4$ – повторно-короткочасний з частим пусканням, $S5$ – повторно-короткочасний з частими пусками і електричним гальмуванням, $S7$ – переміжний з частими реверсами і $S8$ – переміжний зі зміною частоти обертання.

Тривалий навантажувальний режим роботи $S1$ двигуна ЕП характеризується довготривалою номінальною потужністю, яку зазначають на паспортному щитку електродвигуна. З цією потужністю двигун може працювати необмежено довго. При цьому температура всіх частин електродвигуна досягає ustalених значень.

Для короткочасного навантажувального режиму роботи $S2$ крім потужності указується і гранична тривалість роботи з цією потужністю. Електродвигуни режиму $S2$ випускають на стандартні тривалості роботи з навантаженням 10, 30, 60 і 90 хв.

Навантажувальний режим повторно-короткочасний $S3$ електродвигуна додатково до паспортної потужності характеризується тривалістю навантаження (ТН): яку виражають у відсотках:

$$TN\% = \frac{t_{роб}}{t_{роб} + t_{x.x}} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100 \quad (8.17)$$

де $t_{роб}$ – тривалість роботи з навантаженням;

$t_{x.x}$ – час холостого ходу (пауза) без навантаження;

$t_u = t_{роб} + t_{x.x}$ – тривалість робочого циклу, котрий повинен бути не більш 10 хв.

Стандартні значення ТН: 15, 25, 40 і 60%.

На щитку двигуна в графі „режим роботи” зазначається його номінальна тривалість роботи з навантаженнями, наприклад, ТН=25%.

8.3.2. Теплові режими і загальні питання вибору потужності електродвигунів

Одним із основних факторів, що лежать в основі класифікації номінальних режимів $S1, \dots, S8$ є особливості їх нагрівання та охолодження.

При перетворенні електричної енергії в механічну двигун здійснює корисну роботу з переборювання сил опору виконавчого органу робочої машини. Кількість корисної роботи, що здійснюється в одиницю часу s , як відомо називається корисною потужністю P_2 , або потужністю, що знімається із вала двигуна.

Кількість електричної енергії, яку споживає двигун із мережі живлення в секунду називається спожитою потужністю P_1 .

Спожита потужність, двигуном постійного струму визначається за формулою

$$P_1 = U_{НОМ} \cdot I_{Я,НОМ} \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \quad (8.18)$$

де $U_{НОМ}$ – номінальна напруга на затискачах двигуна, В;

$I_{Я,НОМ}$ – номінальний струм якоря А, номінальним навантаженням.

Спожита потужність, асинхронним двигуном змінного струму P_1 , буде

$$P_1 = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \quad (8.19)$$

де $U_{Л}$ – лінійна (міжфазна) напруга на затискачах двигуна, В;

$I_{Л}$ – лінійний струм двигуна, А;

$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_{Л} I_{Л}}$ – коефіцієнт потужності за навантаженням двигуна.

У процесі виконання двигуном корисної роботи неминуче виникають втрати у самому двигуні, через ці втрати спожита потужність P_1 завжди більша, ніж корисна потужність на валу двигуна P_2 , а їх різниця складає потужність втрат ΔP :

$$\Delta P = P_1 - P_2, \text{ кВт} \quad (8.20)$$

Ці втрати цілком виділяються в двигуні у вигляді теплоти, кількісне значення якої за законом Джоуля-Ленца залежить від квадрата струму. В результаті температура електродвигуна у процесі роботи поступово підвищується. Це відбувається до тих пір, поки кількість теплоти, що виділяється в електродвигуні в одиницю часу, не виявиться рівною

кількості теплоти, що віддається ним в навколишнє середовище. При цьому припиняється подальше нагрівання двигуна і настає усталений тепловий режим.

На практиці дуже часто електродвигуни вимикаються раніше, ніж настає тривалий усталений тепловий режим. Після вимикання гріючі втрати в електродвигуні починають дорівнювати нулю, і двигун охолоджується. Зниження температури електродвигуна відбувається також і при спаді навантаження, в результаті зменшення втрат в його обмотках.

Залежно від режиму роботи електродвигуна кожний із них характеризується довготривалістю роботи і довготривалістю паузи. Робочий період відповідає часу, упродовж якого електродвигун знаходиться під навантаженням, а період паузи – проміжок часу, протягом якого електродвигун виключений або працює в режимі холостого ходу.

При роботі електродвигуна в тривалому режимі робочий період виявляється достатнім для того, щоб температура його досягла свого усталеного допустимого значення. За тривалим режимом роботи тривалість до робочого періоду, як правило, набагато перевищує час паузи.

Короткочасний режим роботи характеризується тим, що в робочий період температура електродвигуна не встигає досягнути свого усталеного значення. При цьому час паузи настільки великий, що його виявляється достатньо для того, щоб температура електродвигуна знизилась до температури навколишнього середовища

При повторно-короткочасному режимі роботи за період роботи електродвигун не встигає нагрітися до усталеної температури, а за час паузи не встигає охолоджуватися до температури навколишнього середовища.

При виборі потужності електродвигуна нагрівання є основним фактором, який обумовлює допустимі умови роботи двигуна у відношенні навантаження і ступені його використання. Найбільш лімітованою у відношенні нагрівання частиною електродвигуна є ізоляція його обмоток. Найбільш допустима температура ізоляції й визначає граничне допустиме нагрівання електродвигуна в цілому. При цьому навіть незначне перевищення температури, принаймні в одній точці електродвигуна, над максимально допустимою для даного класу ізоляції може привести до її порушення і подальшого виходу електродвигуна із ладу. Найбільша допустима температура залежить від якості ізоляції обмоток. У табл. 8.1. приведені основні сім класів ізоляції, що використовуються для сучасних електричних машин, із зазначенням характеристики ізоляційного матеріалу.

Класи нагрівостійкості ізоляційних матеріалів

Клас нагрівостійкості	Гранична допустима температура $^{\circ}\text{C}$	Характеристика ізоляційного матеріалу
У	90	Не просочені бавовняно-паперові тканини, пряжа, папір і волокнисті матеріали із целюлози і шовку.
А	105	Те саме, але просочені спеціальним лаком.
Е	120	Синтетичні органічні плівки.
В	130	Матеріали зі слюди, азбесту і скловолокна, що утримують органічні зв'язувальні речовини.
Ф	155	Те саме, у сполученні з синтетичними зв'язуючими і просочуючими складовими.
Н	180	Те саме, але у сполученні з кремнійорганічними зв'язуючими і просочуючими речовинами.
С	Понад 180	Слюда, керамічні матеріали, скло, кварц, азбест, що застосовуються без зв'язуючих складових або в сполученні з неорганічними зв'язуючими складовими.

Стандартом встановлені максимальні допустимі температури нагрівання для кожного з класів ізоляції. Перевищення максимально допустимих температур призводить до передчасного руйнування ізоляційного прошарку обмоток і, як наслідок, до значного скорочення строку служби електродвигуна.

Варто зазначити, наприклад, що для електричних машин із ізоляцією класу **А** при роботі з температурою обмоток, що дорівнює гранично допустимій температурі 105°C , строк служби складає 15-20 років. При підвищенні температури обмоток до 150°C строк служби електричної машини з ізоляцією того ж класу знижується до 1,5 місяців, а при роботі з температурою обмоток 200°C цей строк знижується уже до 3 годин.

Для сталевих осердь та інших частин електричної машини ГОСТом також нормуються граничні допустимі температури в залежності від прийнятого класу ізоляції.

Наприклад, для ізоляції класу **А** найбільша температура осердя та інших частин машини, що стикаються з обмотками, не повинна перевищувати 65°C . Контактні кільця не повинні мати температуру вище 70°C , а колектори – вище 65°C . Для ізоляції класу **В** указані граничні значення температури відповідно складають 85, 90 і 85°C .

Щоб температура нагрівання не перевищувала допустимих значень, для кожної електричної машини установлюються так звані номінальні, або

паспортні дані: потужність P_2 , напруга, струм, швидкість обертання, додержання яких сприяє нормальній довгостроковій роботі машини без перегрівання. Ці дані зазначаються на паспортному щитку машини.

Для охолодження і кращого відводу тепла всі електричні машини забезпечуються вентиляторами, які насаджуються на вал ротора (якоря). Відсутність вентилятора може привести до перегрівання машини і створення джерела запалювання і виникнення пожежі.

Таким чином, максимально допустимі межі нагрівання електродвигунів визначаються теплостійкістю використаних для їх обмоток ізоляційних матеріалів. Граничні допустимі температури, приведені для різних класів ізоляційних матеріалів, відповідають температурі навколишнього середовища 35°C , при роботі машини з номінальною потужністю, що вказана в паспорті або каталозі. Нагрівання електродвигуна залежить від температури навколишнього середовища, в якому він працює. При цьому зрозуміло, що зі збільшенням температури навколишнього середовища, потужність, що знімається із вала двигуна знижується, а при зменшенні температури може збільшуватися за порівнянням з номінальною потужністю електродвигуна.

Вибір потужності електродвигуна є одним із найважливіших етапів проектування або експертизи електроприводу. При виборі електродвигуна крім урахування режиму роботи, при якому передбачається його використання, доводиться керуватися багатьма іншими факторами. В найпростішому випадку вибір двигуна зводиться до перевірки придатності попередньо вибраного з тих чи інших міркувань стандартного електродвигуна. В ідеальному випадку розрахункова потужність електродвигуна повністю відповідає номінальній потужності виконавчого механізму, для привода якого призначений цей двигун. Перевищення або заниження потужності електродвигуна буде призводити до небажаних, а в деяких випадках недопустимих наслідків.

При цьому, якщо вибір електродвигуна заниженої потужності неминуче призводить до виходу його із ладу з наступним порушенням виробничого технологічного процесу, то перевищення призводить до пониження коефіцієнта корисної дії і коефіцієнта потужності двигуна, підвищенню вартості устаткування, а також збільшенню маси і габаритів установки в цілому.

Вибір потужності електродвигуна тісно пов'язаний і з багатьма другими факторами, що характеризують його роботу. До них відносяться: перевантажувальна здатність, необхідний пусковий момент, частота обертання, необхідність регулювання швидкості електропривода, конструктивне виконання двигуна, необхідність його захисту від дії навколишнього середовища та інші. При цьому велике значення має вигляд потрібної в кожному окремому випадку механічної характеристики, що визначає залежність частоти (швидкості) обертання виконавчого механізму від навантаження.

8.3.3. Вибір потужності електричних двигунів для довготривалого незмінного навантаження (режим S1)

Потужність електродвигуна у всіх випадках визначається тією потужністю, яка споживається виробничим виконавчим механізмом при виконанні заданого технологічного процесу. У виробничих умовах є велика кількість виконавчих механізмів, які працюють при довготривалому незмінному або ж при малозмінному навантаженні.

Режими роботи електродвигунів характеризуються навантажувальними діаграмами, які показують, як змінюється потужність, що споживається електродвигуном за часом у процесі його роботи.

При роботі електродвигуна в довготривалому режимі робочий період виявляється достатнім для того, щоб температура електродвигуна досягла усталеного значення (рис. 8.3).

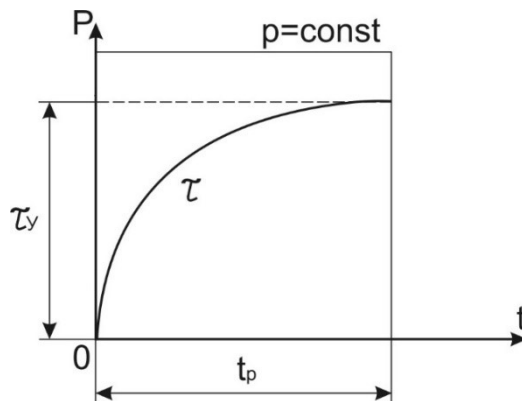


Рис.8.3. Навантажувальна характеристика і зміна температури електродвигуна в часі при довготривалому незмінному навантаженні

При цьому нагрівання електродвигуна відбувається у відповідності з рівнянням

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}), \quad (8.21)$$

де τ — перевищення температури електродвигуна над температурою навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

τ_y — усталене значення температури електродвигуна, $^{\circ}\text{C}$;

t_p — робочий період механізму (тривалість роботи), c ;

$T_H = \frac{C}{A}$ — постійна часу нагрівання (час, протягом якого електродвигун досягнув би усталеної температури за відсутності віддачі тепла в навколишнє середовище, c);

A — тепловіддача електродвигуна ($\text{Дж}/\text{c} \cdot \text{град}$), тобто кількість тепла, що виділяється електродвигуном в навколишнє середовище за

одиницю часу при різниці температур між двигуном і навколишнім середовищем, в 1°C ;

C – теплоємність електродвигуна, тобто кількість тепла, яка необхідна для підвищення температури двигуна на 1°C .

Досвід показує, що час роботи t_p електродвигуна в довготривалому режимі під навантаженням, що відповідає нагріванню його до усталеного значення температури, складає не менше 3-4 значень постійної часу нагрівання T_H тобто $t_p \geq 3...4T_H$.

Постійна часу нагрівання T_H характеризує швидкість нагрівання електродвигуна і показує час, протягом якого двигун досягнув би усталеної температури τ_y за відсутністю віддачі тепла в навколишнє середовище. За наявності тепловіддачі, що відповідає реальним умовам роботи, температура електродвигуна за час T_H досягає значення $\tau = 0,632\tau_y$.

Для механізмів, які працюють у довготривалому незмінному режимі, вибір потужності електродвигуна зазвичай не викликає особливих труднощів і здійснюється за каталогом, виходячи із потужності, яку споживає відповідний виконавчий механізм при даній частоті обертання. Якщо електродвигуна, розрахованого на дану номінальну потужність, в каталозі немає, то вибирається двигун, розрахований на найближчу більшу потужність. Вибраний таким чином електродвигун забезпечує нормальну роботу відповідного виконавчого механізму в ході виконання технологічного процесу при найбільших значеннях енергетичних показників і забезпеченні недопустимого його нагрівання при необмеженому довготривалому режимі роботи.

Таким чином, якщо задана номінальна (розрахункова) потужність виробничого механізму P_M , то при довготривалому незмінному навантаженні розрахункова потужність P_p електродвигуна, необхідна для привода його в рух $P_p = P_M / \eta_{\Pi}$, де η_{Π} – ККД системи передачі від двигуна до виконавчого механізму. З урахуванням цього номінальна потужність потрібного електродвигуна визначається із умови

$$P_{НОМ} \geq P_p, \quad (8.22)$$

де $P_{НОМ}$ і P_p – відповідно номінальна потужність електродвигуна і розрахункова потужність виробничого механізму.

У ряді випадків задається не потрібна потужність, а момент на валу виробничого механізму і швидкість його обертання. В цьому випадку розрахункова потужність механізму P_p , кВт , дорівнює

$$P_p = \frac{\omega_M}{1000 \cdot \eta_H} \cdot M_p \text{ або } P_p = \frac{2\pi \cdot n_M \cdot M_p}{60 \cdot 1000 \cdot \eta_{\Pi}} = \frac{n_M}{9550\eta_{\Pi}} \cdot M_p, \quad (8.23)$$

де M_p – розрахунковий момент навантаження на валу електродвигуна, $H \cdot м$;

ω_M і n_M – частота обертання механізму $рад/с$ і $об/хв$ відповідно;

η_{II} – ККД системи передачі.

За значенням розрахункової потужності методом, викладеним вище, вибирається за каталогом номінальна потужність $P_{НОМ} \geq P_p$ потрібного електродвигуна.

8.3.4. Вибір потужності електричних двигунів для найбільш розповсюджених виробничих виконавчих механізмів

Визначення потужності електродвигуна при довготривалому незмінному навантаженні, що найбільш часто зустрічаються в практиці електроприводу виробничих механізмів може бути виконано за наведеними нижче формулами. За одержаним розрахунковим значенням потужності вибирається за каталогом електродвигун з номінальною потужністю, що дорівнює розрахунковому її значенню. У тому разі, коли в каталозі немає електродвигуна з потрібною номінальною потужністю, вибирається електродвигун з найближчою більшою номінальною потужністю.

Електродвигун насоса. Потужність електродвигуна насоса при довготривалому режимі роботи може бути розрахована за формулою

$$P_p = \frac{\gamma Q H K_3}{1000 \cdot \eta_{II} \cdot \eta_H}, \text{кВт}, \quad (8.24)$$

де γ – густина перекачуваної рідини $Н/м^3$ (для холодної води $\gamma = 9810 Н/м^3$);

Q – продуктивність насоса, $м^3/с$;

H – розрахункова висота подачі (м), знаходиться за формулою $H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$,

тут h_1 – висота усмоктування – відстань від рівня рідини до осі насоса;

h_2 – висота нагнітання – відстань від осі насоса до найбільш високого пункту споживання;

h_3 – напір, що враховує втрати у всмоктуючому і нагнітаючому трубопроводах, у вентилях, на поворотах і т.д.;

h_4 – вільний напір, що забезпечує відповідну швидкість витікання рідини із трубопроводу.

K_3 – коефіцієнт запасу (1,1...1,4);

η_H – ККД насоса (для відцентрових насосів високого тиску $\eta_H = 0,5 \dots 0,8$; для відцентрових насосів низького тиску $0,3 \dots 0,6$, а для поршневих насосів – $0,8 \dots 0,9$);

η_{II} – ККД передачі від електродвигуна до насосу (при безпосередньому з'єднанні вала насоса з валом двигуна $\eta_{II} = 1$).

При виборі (або заміні) двигуна до відцентрового насоса треба мати на увазі ідентичну швидкість насоса і двигуна.

У відцентрового насоса потужність P , напір (висота подачі) H , продуктивність Q і момент M мають такі залежності від швидкості обертання n , об/хв:

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{P_2} &= \frac{n_1^3}{n_2^3}, \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \\ \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{n_1}{n_2}, \frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \end{aligned} \quad (8.25)$$

де позначення параметрів з індексом 1 відносяться до паспортної швидкості обертання відцентрового насоса, а з індексом 2 – до іншої швидкості, що відрізняється від паспортної.

Зміну цих параметрів покажемо на конкретному прикладі.

Задача 8.2.

1. Визначити потужність та вибрати за каталогом відповідний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором до відцентрового насоса ЗК6 з подачею $Q = 50 \text{ м}^3/\text{год}$ води і напором $H = 62 \text{ м}$. Паспортна швидкість обертання насоса $n_H = 2900 \text{ об/хв}$, $\eta_H = 0,65$.

2. Визначити зміну потужності двигуна, напору насоса і його продуктивність, якщо двигун, що обертається з номінальною швидкістю 2900 об/хв , замінити двигуном, який має номінальну швидкість обертання $n_{\text{ов}} = 1460 \text{ об/хв}$ аналогічної потужності.

Розв'язання.

1. Необхідна потужність приводного двигуна насоса при швидкості обертання $n_1 = 2900 \text{ об/хв}$ за (8.24)

$$P_1 = \frac{9810 \cdot 50 \cdot 62 \cdot 1,1}{1000 \cdot 1 \cdot 0,65 \cdot 3600} = 14,3 \text{ кВт},$$

де 3600 – коефіцієнт переведення продуктивності насоса із $\text{м}^3/\text{год}$ в $\text{м}^3/\text{с}$.

2. Відповідно до довідника [8] вибираємо асинхронний двигун загального призначення типу ЧА 160S2У3 з номінальною потужністю $P_{\text{НОМ}} = 15 \text{ кВт}$, $n_{\text{синхр.}} = 3000 \text{ об/хв}$.

3. Якщо буде використаний для привода насоса електродвигун зі швидкістю обертання $n_{об} = 1460 \text{ об/хв}$, то за рівняннями (8.25) будемо мати:

а) Необхідна потужність приводного електродвигуна,

$$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2^3}{n_1^3} \right) = 14,3 \left(\frac{1460^3}{2900^3} \right) = 1,8 \text{ кВт}.$$

б) Величина напору (висота підйому)

$$H_2 = H_1 \left(\frac{n_2^2}{n_1^2} \right) = 62 \left(\frac{1460^2}{2900^2} \right) = 15,7 \text{ м}.$$

в) Продуктивність насоса

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = 50 \left(\frac{1460}{2900} \right) = 25 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Як видно із розрахунків, при зниженні швидкості обертання насоса майже удвічі необхідна потужність двигуна зменшилась (14,3:1,8) у 8 разів, висота підйому рідини зменшилась (62:15,7=4) у 4 рази, а продуктивність (50:25=2) удвічі.

Отже, швидкість обертання відцентрового насоса завжди повинна відповідати величині, що вказана в паспорті.

Необхідно також сприймати до уваги, що якщо пуск насоса відбувається при закритій засувці на виході із насоса, то необхідний пусковий момент двигуна невеликий і має значення 30% від номінального.

Для протипожежних насосів, які відносяться до споживачів електроенергії першої категорії, і для яких необхідний самозапуск, а також при відкритій засувці на виході із насоса, необхідний момент, при підсинхронній швидкості, рівний номінальному $M_{НОМ}$.

Якщо рівень приймального резервуара нижче рівня установки насоса, то для заливки відцентрового насоса перед його пуском, на початку всмоктувальної лінії необхідно ставити зворотний клапан.

Електродвигун вентилятора. Розрахункова потужність електродвигуна вентилятора при довготривалому режимі роботи визначається за формулою

$$P_p = \frac{K_3 Q H}{1000 \cdot \eta_e \cdot \eta_{\Pi}}, \text{ кВт}, \quad (8.26)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу (1,1...1,6);

Q – продуктивність, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – тиск, Па ;

η_e – ККД вентилятора (для осьового вентилятора $\eta_e = 0,4...0,7$, а для відцентрового – $0,4...0,8$);

η_{II} – ККД передачі: для клиноремінної $\eta_{II} = 0,92...0,94$, для плоскоремінної $\eta_{II} = 0,87...0,9$. При прямому з'єднанні двигуна з вентилятором $\eta_{II} = 1$.

Електродвигун поршневого компресора. Потужність електродвигуна компресора при довготривалому режимі роботи розраховується за формулою

$$P_p = \frac{K_3 \cdot Q \cdot B}{1000 \cdot \eta_k \cdot \eta_{II}}, \text{кВт}, \quad (8.27)$$

де Q – продуктивність компресора, $\text{м}^3/\text{с}$;

η_k – ККД компресора (0,6...0,8);

η_{II} – ККД передачі від двигуна до компресора;

B – робота, яка витрачається на стиск 1м^3 повітря до заданого робочого тиску Pa (приймається із таблиці 8.2 (запозичена із [9]));

$K_3 = 1,1...1,2$.

Таблиця 8.2.

Робота, яка витрачається на стиск 1м^3 повітря

Кінцевий тиск, Pa	Робота на стиск, $Дж/м^2$	Кінцевий тиск, Pa	Робота на стиск, $Дж/м^2$
$2 \cdot 10^5$	71600	$7 \cdot 10^5$	224000
$3 \cdot 10^5$	117300	$8 \cdot 10^5$	242000
$4 \cdot 10^5$	152200	$9 \cdot 10^5$	263000
$5 \cdot 10^5$	179000	$10 \cdot 10^5$	273000
$6 \cdot 10^5$	203000		

Задача 8.3. Продуктивність компресора $10\text{м}^3/\text{хв}$, тиск $8 \cdot 10^5 Pa$.

Визначити потужність приводного двигуна компресора.

Розв'язання.

За табл.8.2. приймаємо $B = 242 \cdot 10^3 \text{Дж}/\text{м}^3$, ККД компресора 0,7, ККД передачі 0,9.

Потужність приводного двигуна компресора

$$P_p = \frac{1,2 \cdot 10 \cdot 242 \cdot 10^3}{1000 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 60} \approx 77\text{кВт}.$$

Частота обертання електродвигуна приймається за технічними даними заводу-виробника. Як правило швидкість обертання компресорів невелика $750 - 500\text{об}/\text{хв}$. Типи двигунів можуть бути як асинхронні, так і синхронні. В більшості випадків потужні компресори мають синхронний привод.

8.4. Апарати комутації, захисту та керування електроприводами

8.4.1. Статичні апарати комутації та керування

Керування електроприводами зводиться до виконання різноманітних операцій, які реалізують пуск, гальмування, регулювання частоти обертання, реверсування, підтримку завданих режимів роботи або їх примусову зміну та інших у відповідності з вимогами технологічного процесу. З цією метою використовують різноманітні апарати керування ЕП, які класифікують за основними характерними ознаками:

- за способом керування (апарати ручного і автоматичного управління);
- за призначенням (апарати керування, захисту і сигналізації);
- за принципом дії (електромагнітна, електротеплова, індуктивна, феромагнітна, електронна та інші);
- за родом струму (постійного і змінного струму);
- за конструкцією (відкритого, захищеного, закритого, герметичного та іншого виконання);
- за комутаційною здатністю (сильнострумові, що встановлюються в головних силових колах і слабкострумові, що використовуються в колах управління).

Апарати ручного керування. Апарати ручного керування приводять в дію обслуговуючий персонал. До них відносять: рубильники, вимикачі та перемикачі з ручним приводом, силові й командні контролери, ключі управління, кнопки і кнопкові пости управління, різні завдатчики, реостати і т.п.

Рубильники. Найпростішим вимикаючим апаратом в колах низької напруги є рубильник.

Рубильники виготовляють одно-, дво- і триполюсними на струми до 1000А. Рубильники типу Р, РА – з центральною рукояткою, РБ – з боковою рукояткою, РПЦ – з центральним важільним приводом.

Триполюсний рубильник типу Р (рис.7.4) складається із нерухомих контактів 1 і рухомих контактів 2, виготовлених у вигляді ножів із міді або латуні. Приєднання електричного кола виконується до зажимів 3.

Рубильники зазвичай монтують на плитах, виготовлених із ізоляційного матеріалу або безпосередньо на панелях та шафах управління.

Для запобігання обслуговуючого персоналу випадкового доторкання до струмоведучих частин, а також від ураження електричною дугою (під час вимикання під навантаженням), рубильники закриваються спеціальним захисним кожухом.

У колах управління рубильники використовуються, головним чином, для зняття напруги при оглядах і ремонті електричної апаратури.

Зараз рубильники використовуються рідко, тільки в невідповідальних, другорядних електричних установках.

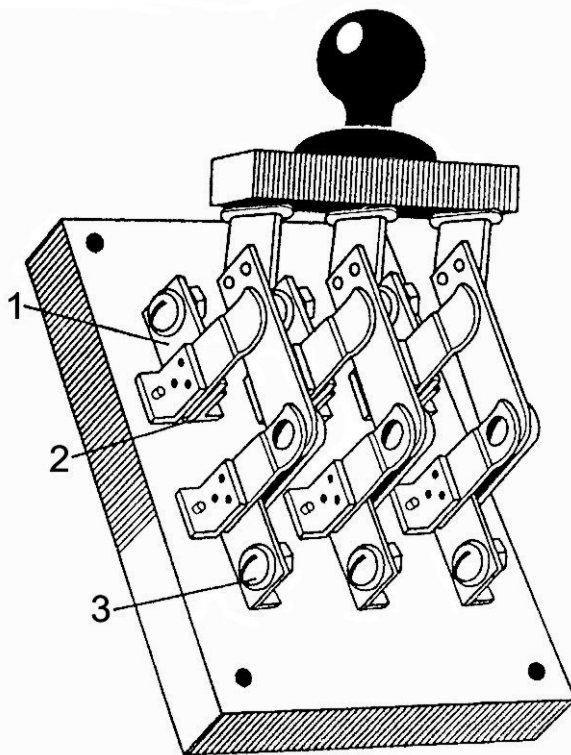


Рис.8.4. Рубильник триполюсний

Пакетні вимикачі. Більш досконалим і більш компактним порівняно з рубильником пристроєм для вмикання і вимикання електрообладнання є пакетний вимикач (рис.8.5).

Нерухомі контакти 1 пакетного вимикача обжимаються зверху і знизу рухомими контактами 2, що розташовані на поворотній частині вимикача.

Струмопроводи закріплюються до ізоляційних прокладок на поворотній частині вимикача за допомогою струмоведучих пластин 3, одна із яких має (рис.8.5, б) чотири загнутих виступи для з'єднання пластин. Поворотний вал 4 ізолюваний від струмоведучих частин шаром ізоляції.

Пакетний вимикач має пристрій, який забезпечує за допомогою пружин 5 фіксацію і швидке, незалежно від швидкості повороту рукоятки, перемикання контактів. Подібний пристрій сприяє швидкому гасінню дуги.

В якості прикладу використання пакетного вимикача для вмикання і вимикання електродвигуна до мережі живлення на рис.(8.5, в) наведена схема підключення.

Пакетні вимикачі ПВМ призначені для комутації силових кіл і кіл управління. Їх випускають на струми від 6 до 400А при напрузі 220, 380В одно-, дво- і трифазного виконання.

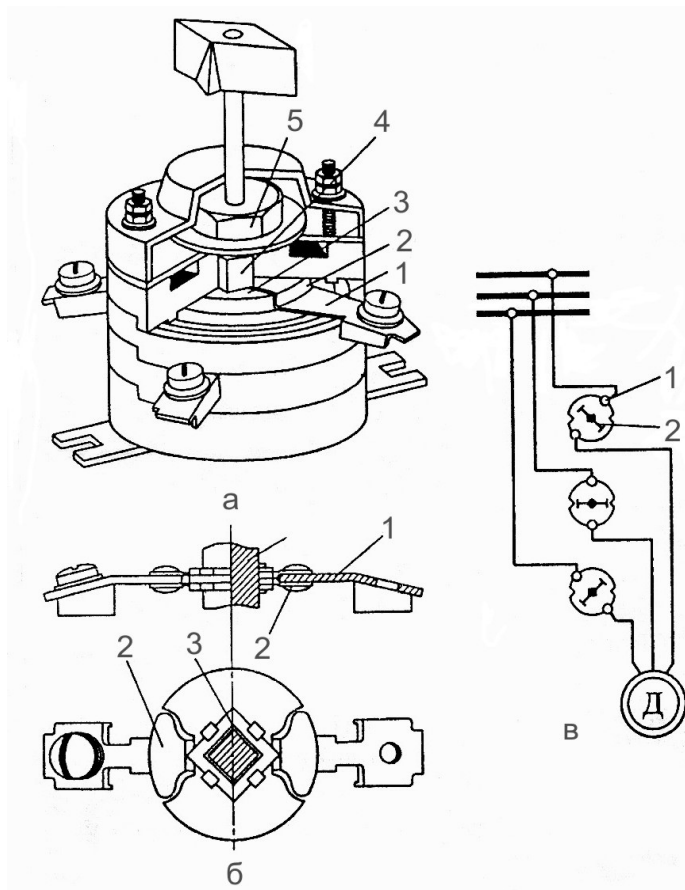


Рис.8.5. Пакетний вимикач:
а – загальний вигляд; б – розріз по одній струмовій частині;
в – схема підключення

Силкові і командні контролери. Вони призначені для комутації кіл змінного і постійного струму і мають подібну конструкцію. Необхідна послідовність комутації кіл забезпечується набірними профільованими кулачками. Різниця полягає лише в тому, що силкові контролери безпосередньо комутують силкові (головні) кола й обладнані перекачувальними контактами з дугогасінням, а командні контролери комутують кола управління (допоміжні) й мають менші габаритні розміри і контакти місткового типу.

Силкові кола при управлінні від командних контролерів комутують силкові електромагнітні апарати – контактори.

Кнопки управління і кнопкові пости. Кнопки управління і кнопкові пости призначені для комутації електричних кіл управління з напругою змінного струму до $500V$ частотою $50Гц$ та постійного струму $220V$ і струмами до $4A$ найчастіше їх використовують для ручного дистанційного керування електромагнітними апаратами рухомих та нерухомих частин стаціонарних установок (контакторами, електромагнітними пускачами,

реле тощо). Кнопки керування серій КУ і КЕ вбудовуються у шафи, панелі, пульти, ящики та інші комплектні пристрої керування електроприводами.

Кількість контактів у кнопці від 1 до 4 у різних комбінаціях (один або два замикаючих, один або два розмикаючих). Контакти електрично не зв'язані між собою.

Кнопки бувають з одним, двома або трьома кнопковими елементами.

Основна деталь керуючого елемента – штовхач, який буває циліндричним або грибовидним чорного, червоного, зеленого, жовтого, блакитного та білого кольорів.

Пости кнопкової серії ПКЕ. Контакти розраховані на номінальну силу струму тривалого режиму $10A$, номінальна робоча сила струму $6A$. Вони мають пластмасовий корпус з отвором для вводу монтажних проводів. Їх виготовляють з будь-якою комбінацією замикаючих і розмикаючих контактів ($2_z, 1_z + 1_p, 2_p$), кількість керуючих елементів (1, 2 і 3).

Резистори і реостати. Їх використовують для пуску, гальмування і одержання необхідних регульовальних характеристик електродвигунів. За призначенням розрізняють: резистори і реостати пускові, гальмівні, регульовальні, пускорегульовальні, додаткові та навантажувальні.

Випускають блоки резисторів з литими площинними елементами типу СЖ від $0,1$ до 100М на струми від 46 до $660A$; типу ЯС-2, ЯСТ-1 і ЯСТ-2 від $0,03$ до 80М на струми від 24 до $215A$ з числом елементів від 7 до 120; типу СН із штампованих спіралей ПП, ЩС, БТС; пускові та регульовальні реостати РП, РЗП, РЗР з дротяними або стрічковими елементами на струми від 30 до $200A$; реостати збудження для машин постійного струму Р, РВМ, РТМ, МР, РПВ та інші.

Автоматичні вимикачі

Автоматичними вимикачами, або автоматами, називаються комутаційні двопозиційні апарати і призначені для вмикання і вимикання електроустановок низької напруги постійного і змінного струму.

Контакти автоматичних вимикачів замикаються за допомогою ручного або механічного привода. Автоматичне розмикання контактів відбувається у випадку відповідної зміни стану кола, пов'язаних з порушенням нормальної роботи останнього (коротке замикання, значне перевищення струму навантаження, зникнення або недопустиме зниження напруги мережі живлення, зміна напрямку постійного струму та інші). При цьому спрацьовує розчіплювач, який обладнаний електромагнітним або тепловим реле. В нормальних умовах роботи кола автомати застосовуються у випадках нечастих вмикань (не більше декількох разів на добу), оскільки їх контакти не розраховуються на постійні вмикання і вимикання.

Автомати займають проміжне положення між апаратами ручного і автоматичного управління. Сучасні автомати поєднують функції комутаційного і захисного характеру і застосовуються для установки на розподільчих щитах для управління електродвигунами, замінюючи рубильники і плавкі запобіжники. Залежно від призначення автомати виготовляють одно-, дво- або триполюсними.

На рис. 7.6 приведена конструктивна схема автоматичного вимикача з електромагнітним розчіплювачем

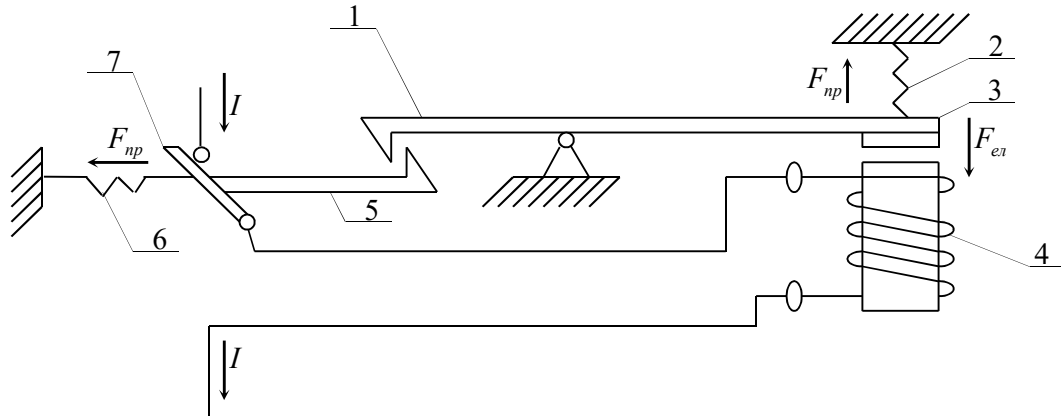


Рис. 8.6. Конструктивна схема автоматичного вимикача з електромагнітним розчіплювачем

При переведенні рукоятки автомата в положення «ввімкнено» зводяться його пружини 2 і 6 та механізм вільного розчеплення. Цей механізм складається із важелів і тяг, має досить складну конструкцію і на рис.8.6 показаний умовно. Завдяки зусиллю $F_{пр}$, що створюється пружиною 2, автомат утримується у ввімкненому стані засувкою 1. Струм захисної електричної мережі, протікаючи по обмотці електромагніта 4, утворює зусилля $F_{ел}$, яке намагається притягнути якорь 3 до електромагніта. Якщо струм в обмотці електромагніта досягне значення, при якому зусилля $F_{ел}$ стане більше сили $F_{пр}$, то якорь 3 притягнеться до електромагніту і проверне засувку і таким чином звільнить важіль 5. Під дією пружини 6 відбудеться розімкнення силових контактів 7.

Пристрій, що діє на засувку автомата (на рис. 8.6 – це електромагніт 4), називається розчіплювачем. За принципом дії або способом виявлення аварійної ситуації, за якої автомат повинен бути вимкнутим, розрізняють розчіплювачі електромагнітні, теплові, нульові, незалежні, мінімальної напруги, напівпровідникові та інші. Залежно від виконання автомат може бути укомплектованим одним або декількома типами розчіплювачів.

Електромагнітні розчіплювачі використовують для швидкого, практично миттєвого відключення автомата за появою значних струмів (струмів КЗ) в колі, яке захищає автомат. На заводі при виготовленні

автомата його налагоджують на відповідний струм спрацювання, який в умовах експлуатації регулюванню не підлягає.

Для виконання захисту від перевантажень частіше за все використовують теплові розчіплювачі. Основним елементом теплового розчіплювача є біметалева пластина, виготовлена із пластинок двох металів, які мають різні температурні коефіцієнти розширення. Зварюванням або гарячою прокаткою пластинки жорстко скріплені між собою. При нагріванні біметалева пластина згинається. Якщо при цьому один кінець пластини буде закріпленим, то другий – вільний, – буде переміщуватися при згинанні пластини й тому він здатний розвивати деяку силу. Це явище використовується в автоматах для впливу на механізм вільного розчеплення.

Згинання біметалевої пластини від нагрівання її струмом використовується і в теплових реле, що вбудовуються в магнітні пускачі для захисту електродвигунів від перевантаження, тільки в теплових реле вільний кінець пластини впливає на контактну систему. Нагрівання пластини відбувається або за рахунок теплоти, що виділяється пропусканням по ній струму навантаження або від спеціального нагрівача, по якому протікає струм або накінець, за рахунок комбінації обох способів нагрівання.

Залежність часу спрацювання теплового розчіплювача від величини струму має такий же вигляд, як і для запобіжників (рис. 8.20). Номінальний струм теплового розчіплювача $I_{н.т}$ може протікати в електричному колі, що захищається, скільки завгодно довго без його спрацювання. Розчіплювач спрацює при струмі $I_{спр.т} = (1.5...1.35)I_{н.т}$ також при струмах більших, ніж $I_{спр.т}$.

На час спрацювання теплових розчіплювачів значною мірою, більше ніж на запобіжники, чинять вплив побічні фактори, головним чином температура навколишнього середовища. Через це для правильної роботи захисту від перевантажень теплові розчіплювачі або теплові реле (тобто автомати або магнітні пускачі) бажано розташовувати в тому ж приміщенні, де знаходиться об'єкт, що захищається. Через ту саму причину автомати і магнітні пускачі з тепловим захистом не можна розміщати поблизу джерел тепла.

Слід відмітити, що відповідно до принципу роботи розчіплювачі з біметалевою пластиною мають досить велику теплову інерційність, що не дозволяє їм забезпечити своєчасне, тобто досить швидке, відключення струмів КЗ. У зв'язку з цим теплові розчіплювачі в автоматах, як правило, використовуються сумісно з електромагнітними. Перші здійснюють захист від перевантажень, другі – від струмів КЗ.

Деякі виконання автоматів, окрім електромагнітних і теплових, утримують незалежний розчіплювач мінімальної напруги. Незалежний електромагнітний розчіплювач призначається для дистанційного відключення автомата. Розчіплювач мінімальної напруги, є також електромагнітним і повинен відключати автомат при зникненні напруги живлення або за зниженням напруги нижче напруги спрацювання. Окрім того, мінімальні розчіплювачі запобігають роботі асинхронних двигунів при недопустимо глибоких зниженнях напруги. Справа в тому, що обертовий момент, який розвиває асинхронний двигун, знаходиться в квадратній залежності від прикладеної напруги.

Так наприклад, якщо напруга живлення асинхронного двигуна знизилася на 30%, тобто до затискачів асинхронного двигуна прикладено 70% від номінальної напруги або $0.70U_n$, то двигун буде розвивати обертальний момент на валу:

$M=(0.7)^2U_n= 0.49 U_n$ – тобто обертальний момент знизиться наполовину, і якщо в такому разі до двигуна приєднане номінальне навантаження, а він розвиває лише половину необхідного моменту, в такій ситуації він загальмується, перейде в режим „перевертання” (режим пуску) який буде для двигуна аварійним, і якщо апарати захисту не відключать двигун від мережі живлення, то обмотки двигуна вийдуть із ладу (перегорять).

Промисловість випускає велику кількість різноманітних автоматів (їх назви можна відшукати в електротехнічних довідниках. Наприклад [8,10]

Відмітимо такі різновиди автоматів, які одержали найбільше розповсюдження.

Автоматичні вимикачі АЕ-2000 (рис.8.7) призначені для установки в електричних мережах напругою 500В змінного струму частотою 50, 60Гц і до 220В постійного струму, для пуску і зупинки асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, а також для оперативних вмикань і вимикань кіл з частотою до 30 вмикань в годину.



Рис. 8.7. Автоматичний вимикач АЕ-200

Крім того, вони здійснюють захист електричних кіл при перевантаженнях і коротких замиканнях.

Вимикачі застосовуються у всіх галузях промислового виробництва. Випускаються для експлуатації в районах з помірним, тропічним, холодним кліматом, в закритих приміщеннях.

Вимикачі виготовляють в одно-, дво-, три і чотириполюсному виконанні з електромагнітним і тепловим максимальним розчіплювачем струму, з незалежним або мінімальним розчіплювачем напруги, з допоміжними контактами, з переднім і заднім приєднанням проводів. Їх перевагами являються температурна компенсація, можливість регулювання споживачем уставки струму спрацювання.

Автоматичні вимикачі серії „Електрон” (рис.8.8) призначені для проведення струму в нормальному режимі і вимиканнях струму при коротких замиканнях і перевантаженнях, а також для нечастих (до 10 разів на добу) оперативних вмикань і вимикань електричних кіл. Вимикачі з номінальним струмом максимально-струмового захисту до 1600А допускають вмикання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

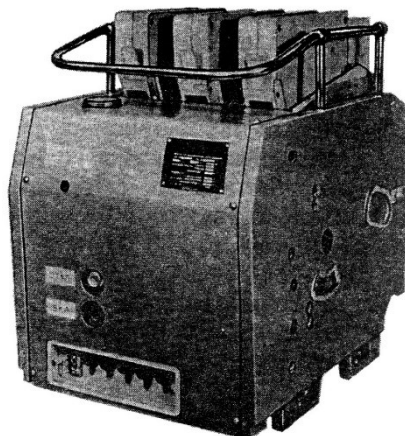


Рис. 8.8. Автоматичний вимикач серії „Електрон”

Вимикачі випускаються в дво- і триполюсному виконанні з ручним і з електродвигунним приводом, стаціонарні із заднім приєднанням, з максимальним розчіплювачем струму і мінімальним розчіплювачем напруги, з максимальним розчепленням струму і незалежним розчепленням.

Вимикачі мають контакт „невідповідності”, який замикає коло сигналізації при спрацюванні максимального розчіплювача струму і залишається замкненим до ручного повернення.

Автоматичні вимикачі серії А3700 призначені для проведення струму в нормальному режимі й вимиканні струму при коротких замиканнях, перевантаженнях і недопустимих зниженнях напруги, а також для нечастих (до 6 разів на годину) оперативних вмикань і вимикань

електричних кіл з номінальною напругою до $440V$ постійного струму, до $600V$ змінного струму частотою 50 і 60Гц і до $380V$ змінного струму частотою 400Гц (рис.8.9).

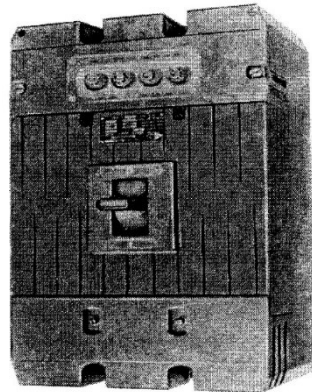


Рис. 8.9. Автоматичний вимикач серії А3700

Вимикачі мають велику кількість виконань і розрізняються: за родом струму (постійний і змінний); числом полюсів (двополюсні і триполюсні); видом розчіплювачів максимального струму (з напівпровідниковими, тепловими, електромагнітними, без розчіплювачів – неавтоматичні) та інші.

На відміну від вимикачів з тепловими і електромагнітними розчіплювачами вимикачі з напівпровідниковими розчіплювачами допускають регулювання параметрів: номінального струму розчіплювача; установку за струмом спрацювання в зоні струмів короткого замикання від 3 до 10 значень номінального струму у колі змінного струму і від 2 до 6 значень номінального струму в колі постійного струму; установки за часом спрацювання у зоні струмів перевантаження від 4 до 16с; установки за часом спрацювання у зоні струмів короткого замикання від 0,1 до 0,4с.

Автоматичні вимикачі серії АП-25 і АП-50 призначені для комутації у колах змінного і постійного струму при навантаженнях до 25 і 50А відповідно.

Автомати випускаються з максимальними і тепловими розчіплювачами. Корпус автомата виготовлений із міцної пластмаси. Вмикання і вимикання автоматів виконується натисканням на відповідні кнопки.

Максимальна потужність електрообладнання, що вмикається за допомогою автомата АП-25, дорівнює 8кВт , а АП-50 – до 20кВт при напрузі $380V$. вимикачі АП-25 і АП-50 не призначені для роботи в умовах вібрації і не придатні для середовища, небезпечного за газом і пилом.

Теплові струмові реле

Теплові струмові реле призначені для захисту асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором від перевантажень недопустимої тривалості. Це комплектні вироби, які вбудовують в електромагнітні пускачі і

комплектні пристрої керування електроприводами. Теплові реле не захищають від струмів короткого замикання і самі потребують захисту від наскрізних струмів короткого замикання.

На рис. 8.10 приведена схема теплового реле. На схемі:

1 – нагрівач; 2 – біметалева пластина; 3 – регулювальний гвинт; 4 – засувка; 5 – важіль; 6 – пружина; 7 – кнопка повернення; 8 – рухомий контакт; 9 – нерухомий контакт; 10 – вивід нагрівача.

Як видно із рис.7.11 теплове реле складається із чотирьох основних елементів: нагрівача 1, що включається послідовно в захищуване від перевантаження коло; біметалевої пластини 2 із двох спресованих металевих пластинок з різними коефіцієнтами теплового розширення; системи важелів і пружин 3 – 7, а також контактів 8 і 9.

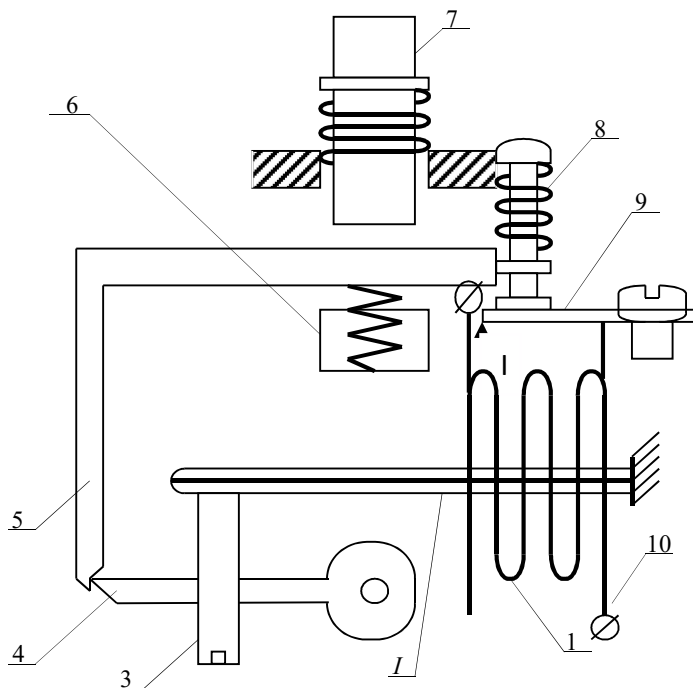


Рис. 8.10. Схема теплового реле

Коли через нагрівальний елемент 1 проходить струм, що перевищує номінальне значення струму електродвигуна, виділяється така кількість теплоти, що незакріплений (на рисунку лівий) кінець біметалевої пластини 2 згинається в бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення (тобто опускається), натискає на регулювальний гвинт 3 і виводить засувку 4 із зачеплення. В цей момент під дією пружини 6 верхній кінець важеля 5 підніметься, розімкне контакти 8 і 9 і розірве коло управління магнітного пускача. Кнопка 7 служить для ручного повернення важеля 5 в початковий стан після спрацювання реле. Ця кнопка знаходиться назовні кришки (оболонки) магнітного пускача.

Із вищевикладеного випливає, що робота теплового реле основна на згинанні біметалевої пластини під тепловою дією струму, яка виділяється в нагрівальному елементі.

Але ця пластинка буде також згинатися під дією тепла навколишнього середовища. Таким чином, у спекотні дні реле буде спрацьовувати швидше, ніж у холодні. Для усунення цього явища в реле застосовують температурну компенсацію, суть якої полягає в тому, що згинанню біметалевої пластинки від зміни температури навколишнього повітря відповідає протилежне за напрямком згинання пластинки компенсатора. Пластинка компенсатора також являє собою біметалеву пластину, але із зворотним по відношенню до основної пластини згинанням.

Електротеплові реле серії ТРН призначені для захисту трифазних електродвигунів з короткозамкненим ротором від тривалих перевантажень, а також від перевантажень, що виникають при обриві однієї з фаз.

Вони мають виконання для встановлення на металевих та ізоляційних панелях, рейках комплектних пристроїв серії ПМА.

Триполюсне виконання реле, застосування незмінювальних нагрівальних елементів і прискорене спрацювання при обриві фази підвищують надійність захисту електродвигунів порівняно з однополюсним чи двополюсним виконанням реле.

Електротеплові реле вибирають таким чином, щоб максимальний струм довготривалого режиму реле з даним тепловим елементом був би не меншим номінального струму захищаного двигуна, струм уставки реле дорівнював би номінальному струму захищеного двигуна, а запас регулювання струму уставки на шкалі реле повинен бути невеликим, особливо в сторону збільшення, оскільки при великому запасі регулювання в бік збільшення можливе закрублення захисту, коли реле не буде працювати.

8.4.2. Автоматичні апарати управління

Управління здійснюється без безпосередньої участі оператора. Апарати приводяться в роботу електричними сигналами (командами), що надходять від джерела дії. Для автоматичного управління електроприводом застосовують контактну апаратуру у вигляді різних електромеханічних комутаторів: контакторів, магнітних пускачів, електромагнітних і герконових реле, шляхових і кінцевих вимикачів тощо. Поряд із контактною апаратурою останнім часом все більше застосування має безконтактна з використанням напівпровідникових силових ключів і комутаторів, різними аналоговими і цифровими мікросхемами, мікропроцесорні засоби та ін.

Контактори – це двопозиційні комутуючі апарати з самоповерненням, призначені для дистанційного вмикання і вимикання електричних кіл і установок постійного і змінного струму напругою до 500В.

Будова триполюсного контактора змінного струму приведена на рис. 8.11.

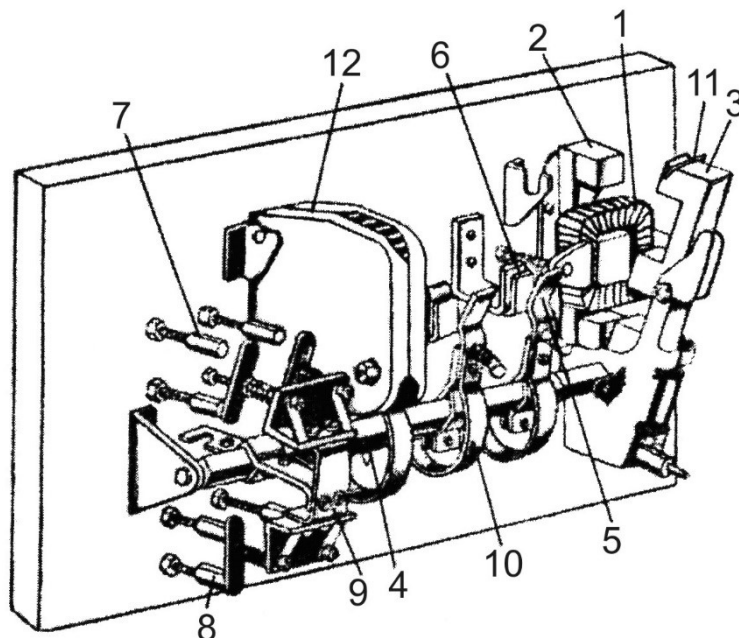


Рис. 8.11 Триполюсний контактор змінного струму: 1 – котушка; 2 – осердя; 3 – якір; 4 – вал; 5 – рухомі силові контакти; 6 – нерухомі силові контакти; 7 – нормально відкриті контакти; 8 – нормально закриті контакти; 9 – контактний міст; 10 – гнучкий провід; 11 – короткозамкнений виток; 12 – дугогасильна камера

Напруга живлення підводиться до затискачів котушки 1 контактора, розрахованої на напругу 127, 220 або 380В. При цьому у розімкненому магнітопроводі виникає магнітний потік, під дією якого якір 3 електромагніта притягується до осердя 2. На якорі жорстко закріплений вал 4, на якому встановлені та ізольовані один від одного рухомі силові контакти 5, які замикаються при подачі напруги на котушку з нерухомими контактами 6, в результаті силове електричне коло замикається.

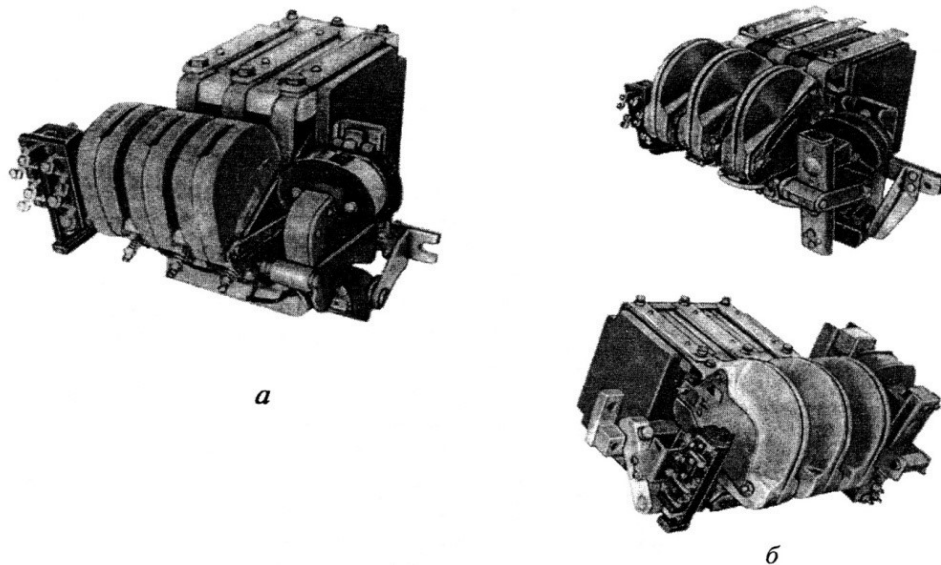
При вимиканні котушки контактора від мережі живлення (за допомогою кнопки управління) магнітний потік в магнітопроводі зникає, якір під дією особистої ваги відходить від осердя, контакти розмикаються, електричне коло розмикається. Приведений на рис.8.11 триполюсний контактор має три пари нормально відкритих контактів 7, розрахованих на комутацію невеликих струмів у колах управління, захисту та сигналізації.

Основні силові контакти (рухомі і нерухомі) захищені камерами дугогасіння 12 (на рис.8.11 дві камери зняті).

Окрім силових контактів, контактор має дві пари нормально відкритих 8 і нормально закритих (замкнених) контактів 9, призначених для перемикання в колах управління (слабких струмів). Такі контакти називають блокуючими, або блок-контактами.

Основною відмінністю контакторів змінного струму від контакторів постійного струму є те, що магнітопровід контакторів змінного струму для зменшення магнітних втрат у ньому, а відповідно, і його нагрівання, набирається із тонких ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі. Магнітопровід контакторів постійного струму виготовляється із електротехнічної сталі з суцільним перерізом, тому що у даному випадку відсутні гріючі втрати в сталі, оскільки магнітний потік не змінюється в часі. Окрім того, у контакторів змінного струму з метою виключення вібрації магнітної системи контактора шляхом підтримки магнітного потоку на рівні, відмінного від нульового значення, в магнітній системі передбачений короткозамкнений виток (на рис. 8.11 поз.11). Пусковий струм котушки контактора перевищує її робочий струм у 8...15 разів. Контактори змінного струму КТ, КТП, КТПВ, КНТ та інші випускають на силу струму від 10 до 1000А з числом комутуючих полюсів від 2 до 5.

Електромагнітні контактори серій КТ64, КТП-64 показані на рис. 8.12.



**Рис.8.12. Електромагнітні контактори:
а) – серії КТ64; б) – серії КТП64**

Магнітні пускачі – це менш потужні, по відношенню до контакторів, комплектні комутаційні пристрої що складається з одного (нереверсивні) або двох (реверсивні) електромагнітів у поєднанні з

захисними тепловими реле і призначені для пуску, реверсу, вимикання і захисту електродвигунів від перевантаження. На рис. 8.13 показана загальна будова магнітного пускача.

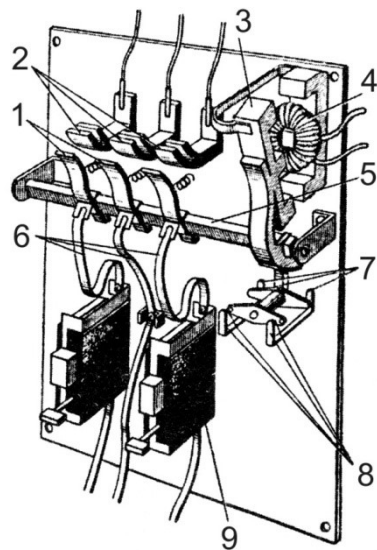


Рис.8.13. Магнітний пускач: 1 – рухомі контакти; 2 – нерухомі контакти; 3 – якір; 4 – котушка; 5 – вал; 6 – гнучкий струмопровід; 7 – нормально відкриті блок-контакти; 8 – нормально закриті блок-контакти; 9 – теплові реле

Як видно з рисунка, магнітний пускач являє собою триполюсний контактор змінного струму, нагрівальні елементи теплових реле якого вмикаються в розсічку двох фаз трифазного споживача.

При тривалому перевантаженні теплові реле спрацьовують і своїми нормально закритими контактами відключають котушку контактора від джерела живлення, і силове коло споживача відключається.

Випускається багато типів магнітних пускачів. Найбільш розповсюджені магнітні пускачі серій ПМ, ПМЕ, ПМА, ПЛ, ПМЛ.

На рис.8.14 наведений загальний вигляд магнітного пускача ПМ12, а на рис.8.15 – магнітні пускачі серії ПМА.

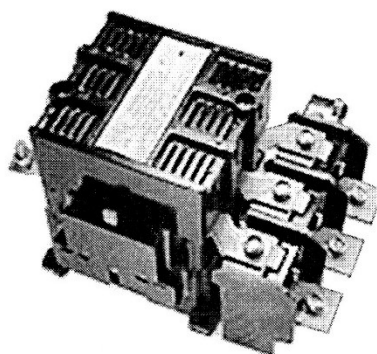


Рис. 8.14. Загальний вигляд магнітного пускача ПМ12 без кожуха з підключеними тепловими реле серії РСТ

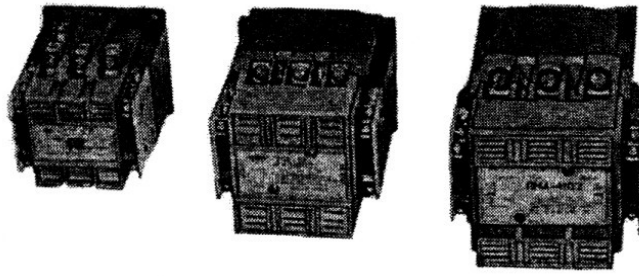


Рис. 8.15. Магнітні пускачі серії ПМА

Пускачі призначені для управління асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором потужністю до 75кВт , а також для захисту їх від тривалих перевантажень і струмів, що виникають при обриві однієї з фаз живлення двигуна.

Пускачі розраховані для роботи при температурі навколишнього середовища від -60 до $+55^{\circ}\text{C}$, при вібрації місць закріплення з частотою 100Гц . Основні виконання пускачів: з електромагнітом постійного і змінного струму, реверсивні та нереверсивні, з тепловим і без теплового реле, відкритого (ступеня IP00) і захищеного (ступенів IP40 і IP54) виконань, без кнопок управління і з кнопками та із сигнальною лампочкою.

Номинальні напруги втягувальних котушок, В:
 змінного струму 24, 36, 40, 48, 110, 127, 220, 380, 660;
 постійного струму 24, 48, 110 і 220.

Поряд з магнітними пускачами в промислових електроустановках широко використовується реле керування захисту і автоматики, вони призначені для організації керування, контролю, автоматизації технологічними процесами, захисту електрообладнання і електричних мереж від коротких замикань, неповнофазних режимів і т.д.

Реле виконують свої функції шляхом вимірювання і комутації кіл керування, автоматики, захисту, переходу від одного фіксованого положення в друге.

За принципом дії реле підрозділяються на електромагнітні, електромеханічні, електротеплові, електропневматичні та інші.

За контрольованою або відтворювальною величиною розрізняють реле напруги, струму, реле часу, реле тиску і рівня і т.п.

Найбільш широкий клас – електромагнітні реле. Ці реле за принципом дії аналогічні контакторам і магнітним пускачам.

Найпростіше електромагнітне реле (рис.8.16) складається із таких елементів: намагнічувальної котушки 1, включеної в коло джерела живлення U_1 ; нерухомого сталюого осердя 4; поворотного сталюого якоря 5; закріпленого на шарнірі 6 і відтягнутого пружиною 7; рухомого і

нерухомих контактів 3, розташованих на пружних металевих пластинах 2. Контакти реле виготовляють із металів, які володіють доброю електропровідністю і теплопровідністю (вольфрам, срібло, платина і т.п.).

Як видно із рис.8.16 електромагнітне реле (за аналогією з контактором) є приладом, що пов'язує два електричних кола: 1) управляюче, яке утримує намагнічувальну котушку електромагніта і джерело живлення, і кероване, що складається із допоміжного джерела живлення U_2 і виконавчого органу (механізму).

Коли в котушці реле струму немає (вихідне положення реле), його ярмі розташований на деякій відстані від осердя. При замиканні управляючого кола реле спрацьовує: осердя намагнічується і притягує до себе ярмі, котрий в свою чергу переміщує рухомий контакт реле, замикаючи кероване коло (див. рис.7.16).

Треба мати на увазі, що у вихідному стані реле його контакти можуть бути не тільки розімкненими, але і замкненими.

Якщо при відсутності струму в котушці реле його рухомий контакт знаходиться на деякій відстані від нерухомих (контакти розімкнені), то таку контактну пару називають замикаючою або нормально відкритою (як на рис.7.16). В робочому стані ці контакти щільно притискуються один до одного і замикають кероване коло.

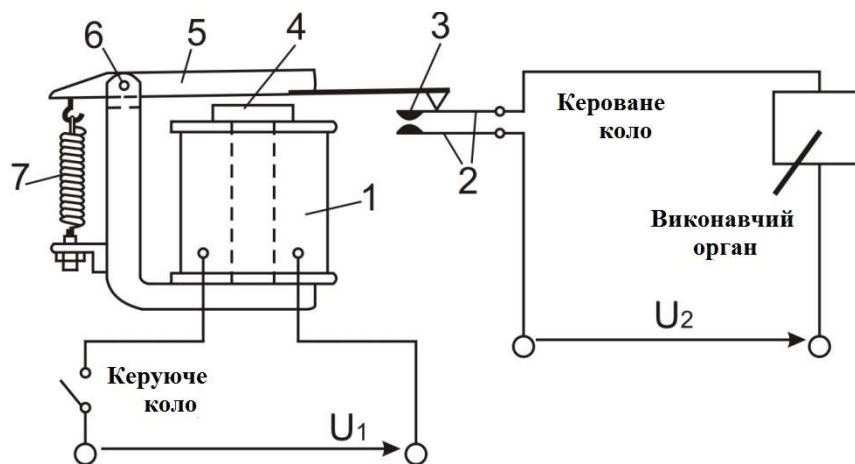


Рис. 8.16. Схематична будова електромагнітного реле

Якщо у вихідному стані реле його контакти замкнені, то їх називають розмикаючими або нормально закритими. При спрацюванні реле вони розходяться, спричиняючи механічний розрив кола управління. Отже, нормально закриті контакти реле працюють на розмикання. Багато які реле виконуються з декількома контактними парами. Такі реле використовуються для керування декількома електричними колами. Час спрацювання електромагнітних реле знаходиться в межах 15-50 мілісекунд.

8.4.3. Керування електроприводами

Основні принципи побудови схем керування електроприводами.

Керування електроприводом складається з процесів пуску і зупинки електродвигуна, регулювання частоти його обертання, гальмування і реверсування, тобто зводиться до безупинної підтримки режиму, обумовленого технологічним процесом виробництва. Керування електроприводом може бути ручним або автоматизованим.

Апарати ручного керування в своїй більшості слугують для вмикання і вимикання електродвигунів відносно невеликої потужності. Ручне керування потужними електроприводами ускладнюється необхідністю використовувати великі зусилля, котрі іноді перевищують фізичні можливості людини. У такому випадку керувати електроприводами можливо тільки за допомогою апаратів автоматичного керування.

Сучасні автоматизовані електроприводи дозволяють керувати машинами і механізмами на відстані, дистанційно, здійснювати зупинку виробничої машини в певному положенні, змінювати напрямок обертання двигуна, захищати двигун і машину від перевантажень, здійснювати потрібну послідовність операцій технологічного процесу і т.д.

Електричні схеми керування електроприводом окремих виробничих механізмів складають на основі вивчення технологічного процесу, вибору типу електродвигуна і використання принципів побудови схем керування. Широке розповсюдження систем автоматичного керування електроприводами привело до створення ряду типових схем управління. Всі елементи апаратів і пристроїв на схемах зображають у вигляді умовних графічних позначень, установлених стандартами ЄСКД або побудованих на їх основі [11].

Основні умовні графічні позначення, які використовуються у схемах керування електроприводами змінного та постійного струму, наведені в розділі 1, додаток Д.1.2.

Електричні схеми бувають структурними, функціональними, принциповими, схемами з'єднань (монтажними).

Структурна схема визначає основні функціональні частини електричного кола (виробу), їх призначення та взаємозв'язок.

Функціональна схема служить для пояснення процесів, що протікають в окремих ланцюгах кола або у виборі в цілому.

Принципова (повна) схема – це конструкторський документ, який виконується без збереження масштабу, і на якому показуються у вигляді умовних графічних позначень усі електричні елементи та пристрої виробу, а також електричні зв'язки між ними. Причому дійсне просторове розташування складових частин вибору, як правило, не враховується.

Принципові схеми використовують для вивчення принципу роботи виробів, а також при їх налагодженні, контролі та ремонті. Вони є основою для розробки інших конструкторських документів, наприклад, схем з'єднань (монтажних) і креслень.

Схема з'єднань (монтажна) показує з'єднання складових частин виробу і визначає проводи, джгути, кабелі, за допомогою яких виконуються ці з'єднання, а також місця їх приєднань і введів, початок і кінець з'єднувальних проводів маркуються відповідними цифрами.

Електричні кола схем розділяють на дві групи: 1) головного струму (силові кола) і 2) допоміжного струму (кола керування).

Силові кола зображуються в схемах товстими лініями; допоміжні кола приєднання котушок і блок-контактів контакторів, магнітних пускачів, реле, кнопкових станцій, елементів захисту, блокувань і сигналізації виконуються в схемах тонкими лініями.

Електромагнітні апарати зображуються в положенні, коли на їх котушки не подана напруга. Перемикаючі апарати показують у вимкнутому положенні, тобто при відсутності впливу на їх рукоятки чи кнопки.

Різні елементи одного пристрою показують в різних електричних колах відповідно до їх функціонального призначення, наприклад, втягувальна котушка магнітного пускача вмикається в коло керування, головні контакти – в силове коло живлення, а додаткові контакти – в коло керування. Приналежність елементів схеми до одного апарата встановлюється за єдиним для всіх його елементів буквеним позначенням.

Принципова схема керування пуском і зупинкою асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

На рис.8.17 приведена сумісна схема дистанційного керування пуском і зупинкою асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. В ній використано магнітний пускач КМ з двополюсним тепловим реле КК1, КК2. При увімкненому триполюсному вимикачі QS після натискання кнопки SB1П „ПУСК” замикається коло для проходження струму через котушку магнітного пускача КМ. В результаті замикаються головні контакти КМ в силовому колі й на обмотки статора подається трифазна напруга, одночасно замикається допоміжний контакт КМ в колі керування, який шунтує кнопку SB1П й не дає цьому колу розімкнутися після самоповернення кнопки. Для зупинки двигуна необхідно натиснути кнопку SB2С «СТОП» при цьому розмикається коло котушки пускача КМ, внаслідок чого розмикаються головні контакти й двигун відмикається від джерела живлення.

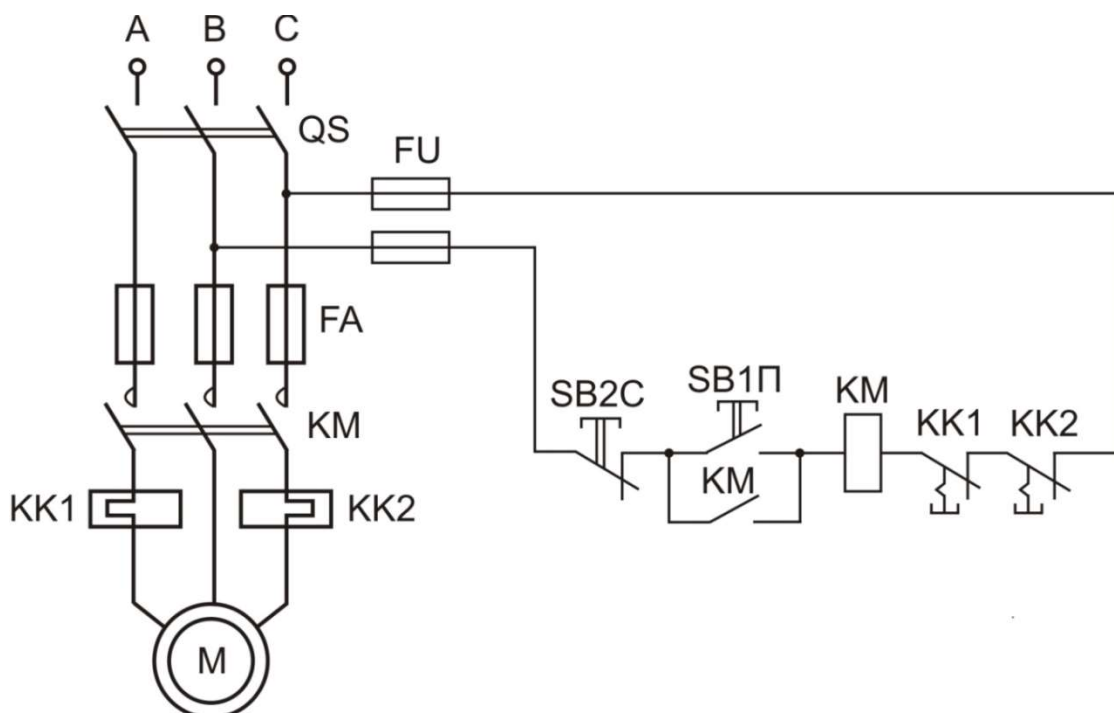


Рис. 8.17. Схема керування пуском і зупинкою асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Захист двигуна від тривалого перевантаження забезпечує двополюсне теплове реле КК, яке своїми контактами з ручним повертанням розмикає коло керування. Запобіжники FU призначені для захисту двигуна і кола керування від струмів короткого замикання.

Реверсивне керування трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.

Для керування трифазними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, які в процесі роботи повинні змінювати напрямок обертання, застосовують магнітні пускачі з двома триполюсними контакторами, які мають кнопки SB1В «вперед», SB2Н «назад», SB3С «стоп» і два теплових реле КК1 і КК2 (рис.8.18).

При увімкненому положенні триполюсного вимикача QS схема готова до роботи. Залежно від вибору напрямку обертання двигуна необхідно натиснути на кнопку SB1В або SB2Н. При обертанні за напрямком «вперед» натискають кнопку SB1В, в такому випадку замикається коло проходження струму через котушку контактора КМ1В. Це призводить до замикання силових контактів КМ1, й на статор асинхронного двигуна подається трифазна напруга. Одночасно додатковими контактами кола керування КМ1 шунтується кнопка SB1В і розмикається коло живлення котушки контактора КМ2 (електрична блокування від одночасного вмикання контакторів КМ1 і КМ2).

Для зміни напрямку обертання необхідно спочатку натиснути кнопку SB3C, схема приходить у вихідний стан і дає можливість натискати на кнопку SB2H. Внаслідок цього замикаються силові контакти контактора KM2, за допомогою яких змінюється послідовність чергування фаз напруги статора двигуна і двигун починає обертатися у протилежному напрямі.

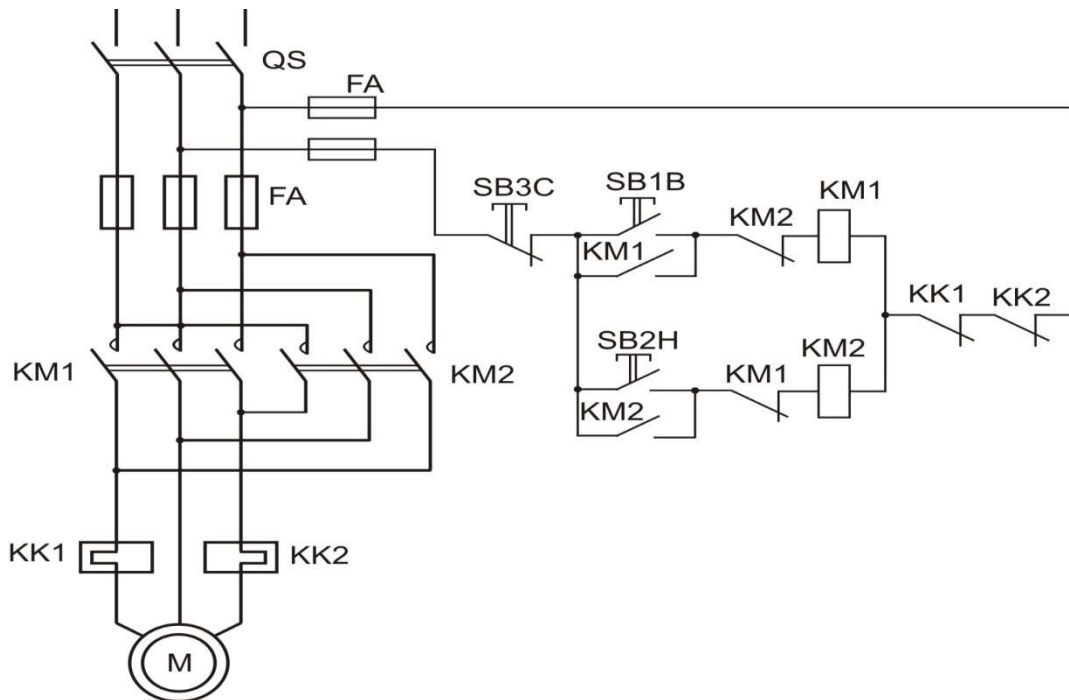


Рис. 8.18. Схема реверсивного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором

У будь-якому випадку для зупинки двигуна необхідно натиснути на кнопку SB3C, що призведе до розмикання кола керування, розімкнуться силові контакти і двигун зупиниться.

Схема керування пуском і зупинкою двигуна постійного струму з паралельним збудженням.

Схема керування двигуном постійного струму з паралельним збудженням наведена на рис.8.19. Це – типова схема резисторного пуску двигуна постійного струму з паралельним (незалежним) збудженням і пуском в одну ступінь з використанням струмового реле KI. Котушка струмового реле ввімкнена в коло якоря двигуна. В схемі також передбачено проміжкове (блокувальне) реле напруги KY, тривалість спрацювання якого повинна перевищувати тривалість спрацювання струмового реле KI.

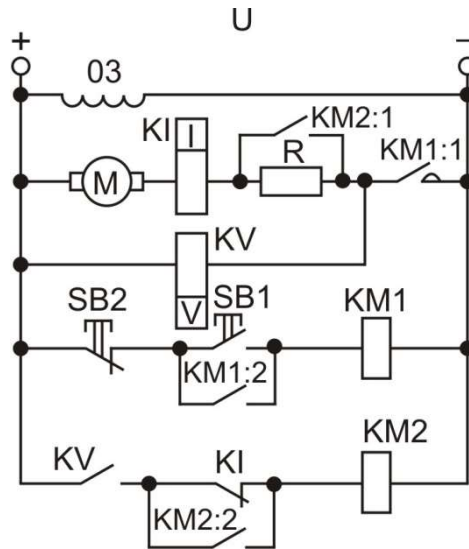


Рис. 7.19. Схема керування пуском двигуна постійного струму з паралельним збудженням

Пуск двигуна здійснюється натисканням кнопки SB1 «ПУСК». При цьому котушка лінійного контактора KM1 одержує живлення, він спрацьовує і своїм силовим контактом KM1:1 вмикає двигун в мережу через резистора R. Кидок пускового струму двигуна, супроводжується спрацюванням струмового реле KI що спричиняє більш раніше розмикання контакту KI струмового реле по відношенню до замикання контакту KV проміжного реле. По мірі розгону двигуна струм якоря знижується до значення, достатнього для відпускання струмового реле і замикання його контакту в колі контактора KM2. Спрацьовує контактор прискорення KM2, який одним замикаючим контактом KM2:1 шунтує пусковий резистор R, другим KM2:2 стає на саможивлення. Двигун виходить на природну механічну характеристику і закінчує розбіг.

Для вимикання двигуна і повернення схеми у вихідне положення слід натиснути на кнопку SB2 «СТОП». Котушка лінійного контактора KM1 втрачає живлення, розмикаються контакти KM1:1 і KM1:2, двигун зупиняється, схема приходить у вихідний стан.

8.4.4. Захист електроприводів від аварійних режимів

8.4.4.1. Плавкі запобіжники

Плавкі запобіжники – це апарати одноразової дії для захисту електрообладнання і мереж від короткого замикання і значних довготривалих перевантажень з використанням теплової дії струму.

Плавкі запобіжники вмикаються послідовно з об'єктом чи мережею, що захищається. За виникненням аварійної ситуації об'єкти чи

елементи, що захищаються, автоматично відключаються від джерела живлення через згорання (розплавлення) каліброваного дротика або пластинки, що знаходиться всередині запобіжника і називається *плавкою вставкою*, яка розрахована на певний номінальний струм $I_{ном.вст.}$. Заміна згорілої плавкої вставки новою дозволяє використовувати запобіжник повторно.

Плавкі запобіжники застосовують в установках на номінальну напругу до 1000 В з використанням в них каліброваних плавких вставок, що виготовляються в залежності від конструкції запобіжників на номінальні струми від 1 до 1000 А. Плавкі вставки не забезпечують своєчасного вимикання захисних об'єктів при перевантаженні їх струмом за величиною до $1.5I_{ном.}$, тому що за таких обставин вони можуть перегоріти через 1 годину і більше, коли об'єкт чи мережа встигнуть перегрітися і навіть вийти із ладу. З цієї причини плавкі запобіжники використовують в маловідповідальних установках для захисту від струмів короткого замикання, тому що при таких обставинах вони надійно упродовж декількох секунд забезпечують відключення захисного кола при струмі $I > 2.5I_{ном.}$ внаслідок розплавлення, згорання плавкої вставки. Чим більший струм протікає через плавку вставку, тим швидше вона розплавляється і швидше відключить від мережі обладнання, яке вона захищає.

За номінальним струмом плавкої вставки запобіжник вибирається з дотриманням наступної умови:

$$I_{ном.вст.} > I_{max} ; \quad (8.28)$$

де: $I_{ном.вст.}$ – номінальний струм плавкої вставки, А, величина якого вказується на каліброваній пластинці вставки або на фарфоровому стаканчику, всередині якого встановлена плавка вставка;

I_{max} – максимально допустимий робочий струм у колі, яке захищається.

Залежність часу спрацювання (розплавлення) плавкої вставки від відношення струму у колі I_{max} до номінального струму плавкої вставки запобіжника $I_{ном.вст.}$, $I_{max} / I_{ном.вст.}$ зображена на рис.8.20.

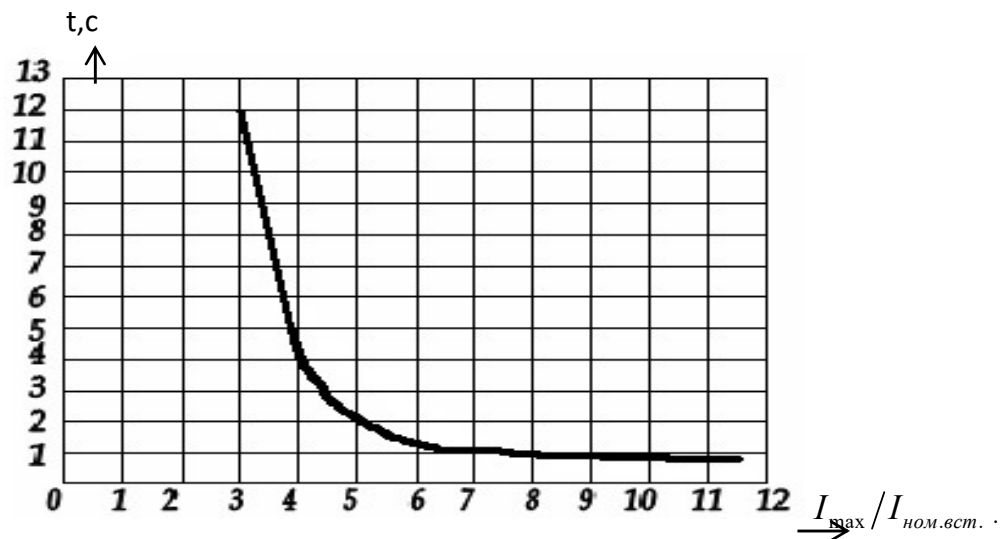


Рис. 8.20. Графік часу спрацювання плавкої вставки запобіжника від струму у колі

Крива показує, що із збільшенням струму час спрацювання вставки зменшується; проте, починаючи приблизно із співвідношення $I_{\max} / I_{\text{ном.вст.}} \approx 6 \div 7$ подальше збільшення струму на час спрацювання плавкої вставки практично не впливає, але це дуже короткий проміжок часу (в залежності від матеріалу плавкої вставки) і подальше збільшення струму призведе до миттєвого перегорання плавкої вставки і автоматичного відключення від мережі об'єкта, який захищається.

Плавкі вставки виконуються або з того ж металу, що і провoda кола, тобто із матеріалу з хорошою електричною провідністю, але відповідно меншого перерізу, або із металу з великим питомим опором, наприклад, свинцю і його сплавів. Такі запобіжники володіють великою теплоємністю і тим самим великою тепловою інерцією.

Конструктивно плавкі запобіжники виконуються по-різному. На рис.8.26 показані схематичні зображення деяких запобіжників.

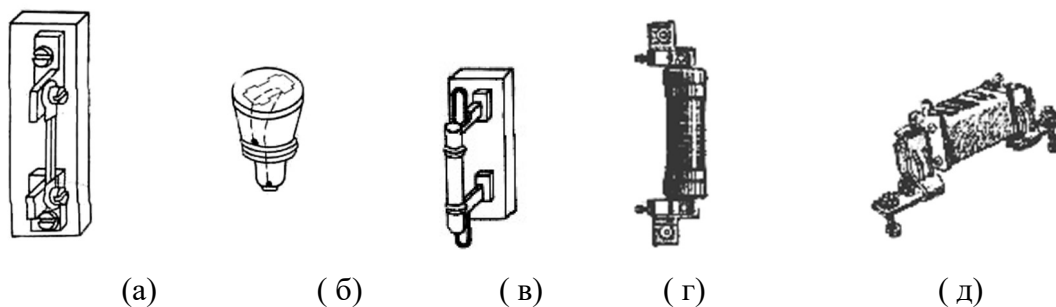


Рис. 8.21. Плавкі запобіжники

На рис. 8.21а – відкритий запобіжник типу П, в якому в якості плавкої вставки слугують мідні дротики або пластинки, припаяні до латунних наконечників.

Закриті пробкові запобіжники (рис. 8.21б) для захисту освітлювальних і малопотужних відгалужень силових кіл ПК – 27. Різьба гільзи Е 27. Плавка вставка у вигляді металевого дротику розміщується в середині «пробки» одним кінцем припаяна до наконечника, а другим до різьби.

Існують ще запобіжники різьбової серії типу ПРС (таблиця 8.3). Вони складаються із ізоляційної основи, що має різьбову гільзу для встановлення головки з плавкою вставкою. Плавка вставка заповнена кварцовим піском і має покажчик спрацювання. Плавкі вставки ПВД нерозбірні.

Таблиця 8.3

Технічні характеристики запобіжників серії ПРС

Типи	Номинальні сили струму основи, А	Номинальні сили струму плавкої вставки, А	Габарити	Різьба гільзи
ПРС – 6	6	1,2,4,6	I	Е 21
ПРС – 25	25	4,6,10,16,20,25	II	Е 27
ПРС – 63	63	20,25,40,63	III	Е 33
ПРС - 100	100	40,63,80,100	IV	М 52x1.5

Рис. 8.21в – відкриті трубчасті запобіжники типу СПО в яких металева плавка вставка розміщена всередині фарфорової фасонної трубки і закріплюється гвинтами до контактних ножів, що в свою чергу закріплені на кінцях трубки. На практиці використовуються рідко і зустрічаються у застарілому електрообладнанні.

Рис. 8.21г – закриті розбірні газогенеруючі запобіжники типу ПР2 (таблиця 8.4). Запобіжник складається із фібрової циліндричної трубки, на кінцях якої прикріплені латунні кільцеві наконечники із різьбою. За допомогою латунних ковпачків, що нагвинчуються на ці наконечники, притискуються контактні ножі. До контактних ножів гвинтом закріплюється плавка вставка.

Плавкі вставки для запобіжників типу ПР2 виробляють із цинку. Для полегшення гасіння електричної дуги вони мають звужені місця. Швидкому гасінню дуги сприяють гази, що виділяються зі стінок патрона (трубки), в момент перегорання вставки. Тиск у трубці при цьому підвищується, дуга швидко гасне, запобіжник спрацьовує і вимикає споживач, який він захищає.

На сьогодні запобіжники типу ПР2 знаходять обмежене використання, але вони мають суттєву перевагу перед деякими іншими типами запобіжників, що використовуються в електричних мережах – дозволяють швидко замінити перегорілу плавку вставку.

Таблиця 8.4

Технічні характеристики запобіжників ПН2

Номинальний струм патрона, А	Номинальний струм плавких вставок, А
15	6,10,15
60	15,20,25,35,45,60
100	60,80,100
200	100,125,160,200
250	200,225,260,300,350
600	350,430,500,600
1000	600,700,850,1000

Рис. 8.21д – закриті нерозбірні запобіжники з наповнювачем типу ПН2 і НПН (таблиця 8.5) – самі розповсюджені запобіжники в силових мережах напругою до 660В змінного струму частотою 50Гц і до 220В постійного струму. В них плавкі вставки розміщені в герметично закритих фарфорових прямокутних чотиригранниках, заповнених кварцовим м'якозернистим піском. Пісок забезпечує швидке і безшумне зникнення дуги, що виникає при перегорянні металевої вставки.

Таблиця 8.5

Номинальні дані запобіжників типу НПН і ПН2

Тип запобіжника	Номинальний струм, А	
	запобіжника	плавких вставок
НПН 15	15	6,10,15
НПН 60М	60	20,25,35,45,60
ПН2 – 100	100	30,40,50,60,80,100
ПН2 – 250	250	80,100,120,150,200,250
ПН2 – 400	400	200,250,300,350,400
ПН2 – 600	600	300,400,500,600
ПН2 - 1000	1000	500,600,750,800,1000

Відповідальна роль плавких запобіжників в захисті електрообладнання потребує до них уважного ставлення. Установка запобіжників із збільшеними струмами номінальних вставок, або так званих „жучків” – некаліброваних вставок неминує призводити до перегрівання провідників, і як наслідок, до їх псування або займання зі всіма впливаючими важкими наслідками. Через це довільне підсилення перерізу плавких вставок категорично НЕПРИПУСТИМО!

8.4.4.2. Розрахунок захисту електроприводів плавкими запобіжниками

На ділянці мережі, де передбачено встановлення запобіжників, за відомими величинами навантажень (потужностей) розраховують робочі (номінальні) $I_{роб.}(I_{ном})$ і максимальні струми $I_{макс}$ (див. Розділ 1, п.1.14.2., формули 1.34-1.37). При розрахунках треба мати на увазі, що для вибухонебезпечних зон (ВНЗ):

$$I_{роб.} = 1,25I_{ном};$$

За відомими даними робочих та максимальних струмів визначається номінальний струм плавкої вставки $I_{ном.вст.}$ запобіжника; за умови:

$$I_{ном.вст.} \geq I_{роб.макс}$$

Номінальний струм плавкої вставки, що захищає відгалуження до асинхронного двигуна від короткого замикання, вибирається за формулою:

$$I_{ном.вст.} \geq \frac{I_{макс}}{\alpha} = \frac{I_{пуск}}{\alpha}; \quad (8.29)$$

де $I_{макс}$ – максимальний або пусковий струм асинхронного двигуна

$$I_{макс} = I_{пуск} = I_{ном} \cdot \kappa_i,$$

де κ_i – кратність пускового струму асинхронного двигуна, визначається за його паспортними даними (зазвичай $\kappa_i = (5 - 6)I_{ном}$).

α – коефіцієнт, що забезпечує неспрацювання запобіжника при протіканні по ньому пускового струму $(1,5 \div 5)c$.

Величина коефіцієнта α залежить від типу запобіжника, що використовується та умов пуску асинхронного двигуна.

Для безінерційних запобіжників типу ПН-2, НПН (див. Табл.8.5) і нормальних умовах пуску коефіцієнт α приймають рівним 2,5, а за тяжких умов пуску (наприклад, з навантаженням на валу) – 1,6.

Для малоінерційних запобіжників типу ПР2 (див. табл.8.4) і нормальних режимах пуску коефіцієнт α дорівнює 3, а за тяжких умов пуску – 2.

Якщо в мережі, що розраховується, ввімкнута група двигунів, яка складається з n двигунів, то максимальний струм визначається за формулою:

$$I_{макс.п.} = I_{п.макс} + \kappa_0 \sum_1^{n-1} I_{ном} \quad (8.30)$$

де $I_{п.макс.}$ – пусковий струм найбільшого по потужності двигуна даної групи;

κ_0 – коефіцієнт одночасності, що враховує неодноразовість роботи споживачів і різний ступень їх завантаження (див. розділ 1, п.1.14.2.).

$\sum_1^{n-1} I_{ном}$ – сума номінальних струмів споживачів даної групи, що

приєднані до мережі, без урахування струму двигуна, який має найбільший пусковий струм.

За даними розрахунків за таблицями 8.3, 8.4, 8.5 вибирають тип запобіжника і номінальні струми плавких вставок з найближчими до розрахункових стандартними значеннями.

Підрахована і вибрана таким чином плавка вставка не захищає переріз проводу відгалуження від перевантаження, проте повинно дотримуватися співвідношення

$$I_{ном.вст.} \leq 3I_{доп.} \quad (8.31)$$

де $I_{доп}$ – довготривалий допустимий струм для даного перерізу провідника, що живить навантаження, визначається за додатками 2.1 таблиці Д 2.1, Д 2.2

Якщо нерівність (8.31) недотримана, то необхідно збільшити переріз до необхідного значення, при цьому струм плавкої вставки зберігається попереднім.

Задача 8.7. Від трансформаторної підстанції з номінальною напругою на низькій стороні 380/220В прокладена електрична мережа живлення електрообладнання механоремонтного цеху (рис.8.22).

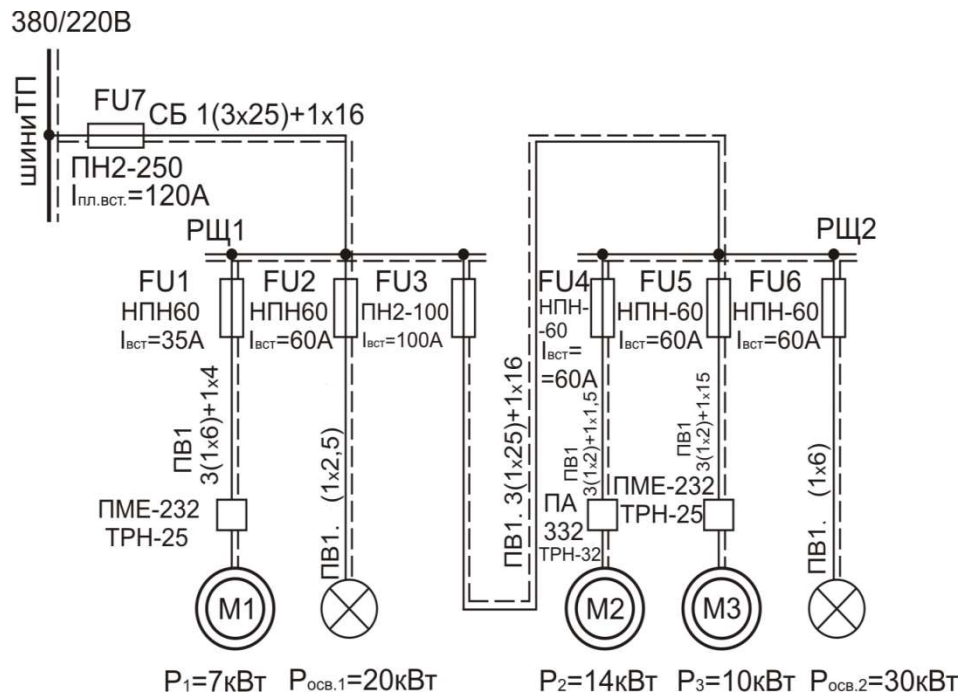


Рис. 8.22. Схема мережі живлення

Характеристика асинхронних короткозамкнених електродвигунів

Характеристика	Номер електродвигуна		
	M_1	M_2	M_3
Потужність P , кВт	7	14	10
Кратність пускового струму κ_i	5,5	5,0	5,5
Коефіцієнт корисної дії η	0,82	0,85	0,87
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,9	0,88	0,92
Коефіцієнт завантаження κ_s	1,0	0,8	0,9

Електродвигуни, що зображені на схемі і в таблиці до задачі – асинхронні з короткозамкненим ротором, освітлювальне навантаження – симетричне. Мережу передбачено виконати:

- 1) від шин ТП до щитка РЩ1 – чотирижильним кабелем з мідними жилами, прокладеним в підлозі;
- 2) від щитка РЩ1 до щитка РЩ2 проводом у газових трубах;
- 3) всі інші мережі – ізольованим проводом по стінам і стелі (відкрита проводка).

Освітлювальне навантаження першої групи ламп $P_{осв.1} = 20 \text{ кВт}$, другої групи $P_{осв.2} = 30 \text{ кВт}$. Необхідно розрахувати і підібрати плавкі вставки запобіжників і вибрати перерізи проводів і кабелів.

При розрахунках необхідно враховувати, що електродвигун M_1 може бути перевантаженим.

Розв'язання.

1. Електродвигун 1.

Номінальний струм двигуна

$$I_{ном1} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{НОМ} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82 \cdot 0,9} = 14,4 \text{ А}$$

Визначаємо струм плавкої вставки запобіжника.

$$I_{пл.вст.} FU1 \geq \frac{I_{макс.}}{2,5} = \frac{I_{ном.} \cdot \kappa_i}{2,5} = \frac{14,4 \cdot 5,5}{2,5} = 31,6 \text{ А.}$$

Вибираємо запобіжник типу НПН-60М, струм плавкої вставки 35А (див. табл.8.5). У зв'язку з тим, що електродвигун 1 може бути перевантаженим проводка до нього повинна бути захищена від струмів перевантаження. Тоді довготривалий допустимий струм електропроводки $I_{доп} = 1,25 I_{пл.вст.} = 1,25 \cdot 31,6 = 44 \text{ А}$. За додатками 2, табл. Д2.1 вибираємо переріз жили проводу $S = 6 \text{ мм}^2$ ($I_{доп} = 50 \text{ А}$). Приймаємо до прокладання провід марки ПВ1: фазні проводи перерізом $S = 6 \text{ мм}^2$, а нейтральний $S = 4 \text{ мм}^2$.

Перевіряємо вибраний переріз на захист від короткого замикання:

$$I_{\text{пл.вст.}} \leq 3I_{\text{доп.}};$$

$$35 < 3 \cdot 50;$$

$$35 < 150.$$

2. Електродвигун 2.

$$I_{\text{ном.2}} = \frac{14 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,85 \cdot 0,88} = 28,3 \text{ A}$$

$$I_{\text{пл.вст.}} FU4 \geq \frac{28,5 \cdot 5}{2,5} = 56,6 \text{ A}$$

З урахуванням коефіцієнта завантаження споживчим струм
 $I_{\text{сп.}} = 0,8 \cdot I_{\text{ном.2}} = 0,8 \cdot 28,3 = 22,6 \text{ A}$.

Вибираємо запобіжник типу НПН60М (табл. 8.5) струм плавкої вставки $I_{\text{пл.вст.}} = 60 \text{ A}$.

За споживчим струмом (табл. Д2.1) визначаємо переріз жил проводу $S = 2 \text{ мм}^2$ ($I_{\text{доп.}} = 26 \text{ A}$).

Приймаємо до прокладання провід марки ПВ1: фазні проводи перерізом $S = 2 \text{ мм}^2$, нейтральний $S = 1,5 \text{ мм}^2$.

Перевіряємо вибраний переріз на захист від струмів короткого замикання:

$$I_{\text{пл.вст.}} \leq 3I_{\text{доп.}};$$

$$60 < 3 \cdot 26;$$

$$60 < 78.$$

3. Електродвигун 3.

$$I_{\text{ном.3}} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,92} = 19 \text{ A}$$

$$I_{\text{сп.}} = 0,9 I_{\text{ном.}} = 0,9 \cdot 19 = 17 \text{ A}$$

$$I_{\text{пл.вст.}} FU5 \geq \frac{19,5 \cdot 5,5}{2,5} = 41,7 \text{ A}$$

Вибираємо запобіжник типу НПН60Н (табл.7.5) струм плавкої вставки $I_{\text{пл.вст.}} = 60 \text{ A}$.

Вибираємо переріз жили проводу (табл. Д2.1) $S = 2 \text{ мм}^2$ ($I_{\text{доп.}} = 26 \text{ A}$).

Приймаємо до прокладання провід марки ПВ1: фазні проводи перерізом $S = 2 \text{ мм}^2$, нейтральний $S = 1,5 \text{ мм}^2$.

Перевіряємо вибраний переріз на захист від короткого замикання

$$I_{\text{пл.вст.}} \leq 3I_{\text{доп.}};$$

$$60 \leq 3 \cdot 26;$$

$$60 \leq 78.$$

4. Освітлювальна лінія 1, $P_{осв.1} = 20кВт$.

Робочий струм

$$I_{p.1} \geq \frac{20 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380} = 30 A.$$

Вибираємо запобіжник типу НПН60, $I_{нл.вст} FU_2 = 35 A$.

Вибираємо переріз жили проводу $S = 2,5 мм^2$ (табл. Д2.1)
($I_{доп.} = 30 A$).

Приймаємо до прокладання провід марки ПВ1: $S = 2,5 мм^2$.

Перевіряємо вибраний переріз на захист від короткого замикання.

$$I_{нл.вст.} \leq 3I_{доп.};$$

$$35 < 3 \cdot 30;$$

$$30 < 90.$$

5. Освітлювальна лінія 2, $P_{осв.2} = 30кВт$.

$$I_{p.2} = \frac{30 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380} = 45 A.$$

Вибираємо запобіжник типу НПН60, $I_{нл.вст} FU_6 = 60 A$.

Переріз жил проводу $6 мм^2$ ($I_{доп.} = 50 A$).

Приймаємо до прокладання провід марки ПВ1: $S = 6 мм^2$.

Перевіряємо вибраний переріз на захист від короткого замикання.

$$I_{нл.вст.} \leq 3I_{доп.};$$

$$60 < 3 \cdot 50;$$

$$60 < 150.$$

6. Прокладання в газових трубах між РЦ1 і РЦ2.

Робочий струм лінії:

$$I_{роб.} = I_{сн.М2} + I_{сн.М3} + I_{p.2} = 22,6 + 17 + 45 = 84,6 A$$

За робочим струмом вибираємо переріз жил проводу (з урахуванням, що чотири жили будуть прокладені в одній трубі, табл. Д2.1) $S = 25 мм^2$ ($I_{доп.} = 90 A$).

Для вибору струму плавкої вставки запобіжника, розраховуємо максимальний струм лінії:

$$I_{макс} = I_{н.М2} + I_{p.М3} + I_{p.2} = 28,3 \cdot 5 + 17 + 45 = 204 A$$

$$I_{нл.вст.} FU_3 \geq \frac{204}{2,5} = 81,5 A.$$

Вибираємо запобіжник типу ПН2-100, $I_{нл.вст} = 100 A$ (табл.8.5).

Перевірка на дію струмів короткого замикання:

$$I_{нл.вст.} \leq 3I_{доп.};$$

$$100 < 3 \cdot 90;$$

$$100 < 270.$$

Приймаємо до прокладання проводи марки ПВ1: фазні $S = 25 \text{ мм}^2$, нейтральний – 16 мм^2 .

7. Магістральний кабель живлення від ТП до РЩ1:

$$\text{Робочій струм магістралі: } I_{\text{роб.}} = K_o(I_{M1} + I_{\text{спч}} + I_{\text{спз}} + I_{p1} + I_{p2}) = 0,9(14,4 + 22,6 + 17 + 30 + 45) = 116 \text{ А};$$

$$\text{Максимальний струм магістралі: } I_{\text{макс}} = I_{\text{пг}} + K_o(I_{H1} + I_{\text{спз}} + I_{p1} + I_{p2}) = 28,3 \cdot 5 + 0,9(14,4 + 17 + 30 + 45) = 238 \text{ А}$$

Вибираємо переріз жил кабеля з урахуванням, що кабель (чотирижильний) буде прокладено в землі (табл. Д2.3), $S = 25 \text{ мм}^2$ ($I_{\text{доп.}} = 150 \text{ А}$).

$$I_{\text{пл.вст.}} \cdot FU7 = \frac{I_{\text{макс}}}{2,5} = \frac{238}{2,5} = 95 \text{ А.}$$

Вибираємо запобіжник типу ПН-250, $I_{\text{пл.вст.}} = 120 \text{ А}$ за умови селективності.

Перевірка на дію струмів короткого замикання:

$$I_{\text{пл.вст.}} \leq 3I_{\text{доп.}};$$

$$120 < 3 \cdot 150.$$

Вибираємо для прокладання кабель марки СБ перерізом $1(3 \times 25) + 1 \times 16 \text{ мм}^2$.

8.4.4.3. Розрахунок захисту автоматичними вимикачами

При виборі автоматичних вимикачів для захисту електроустановок мережі живлення від коротких замикань і перевантажень необхідно дотримати ряд вимог:

1. Номінальна напруга автоматичного вимикача не повинна бути нижче номінальної напруги мережі живлення $U_{\text{ном}}$, тобто:

$$U_{\text{авт.вим.}} \geq U_{\text{ном.}} \quad (8.32)$$

2. За своєю вимикаючою здатністю контактна система вимикача повинна бути спроможною витримати максимальні струми короткого замикання, які можуть виникнути на ділянці, що захищається. Ця вимога для освітлювальних і цехових силових мереж напругою до 1000 В зазвичай виконується, якщо $I_{\text{ном}}$ автоматичного вимикача більша за номінальний струм навантаження.

$$I_{\text{авт.вим.}} > I_{\text{ном.нав.}} \quad (8.33)$$

3. Робочий максимальний струм навантаження $I_{\text{роб.макс}}$ не повинен перевищувати номінальний струм теплового розчіплювача $I_{\text{н.т.розч.}}$, а

максимальний допустимий струм для провідників, що захищаються $I_{макс}$ повинен бути меншим ніж струм спрацювання електромагнітного розчіплювача $I_{ем}$:

$$I_{н.тепл.} \geq K_з \cdot I_{роб.макс} \quad (8.34)$$

$$I_{ем} \geq K_н \cdot I_{макс} \quad (8.35)$$

де $K_з$ – коефіцієнт запасу, рівний 1,25;

$K_н$ – коефіцієнт надійності, приймається рівним 1,25.

У більшості випадків електроустановки захищаються як від струмів короткого замикання, так і від струмів перевантаження. Для цього співвідношення між довготривалим допустимим струмом навантаження $I_{доп}$ проводів мережі живлення і струмом вставки апарата захисту повинно задовольняти такимим умовам:

для автоматичних вимикачів, що мають тільки електромагнітні розчіплювачі

$$I_{доп} / I_{ем} \geq 1,25 \quad (8.36)$$

для автоматичних вимикачів, що мають теплові розчіплювачі

$$I_{доп} / I_{н.т} \geq 1 \quad (8.37)$$

Якщо проводка захищена тільки від к.з., то повинні бути дотримані такі співвідношення:

для автоматичних вимикачів, що мають тільки електромагнітні розчіплювачі,

$$I_{ем} / I_{доп} \leq 4,5, \quad (8.38)$$

для вимикачів із регульованими тепловими розчіплювачами

$$I_{н.т} / I_{доп} \leq 1,25, \quad (8.39)$$

для автоматичних вимикачів з тепловими розчіплювачами, що не мають пристроїв регулювання струмів спрацювання,

$$I_{н.т} / I_{доп} \leq 1,0. \quad (8.40)$$

Після вибору перерізу жил провідників необхідно перевірити чутливість захисту і її спроможність захищати дану мережу від недопустимого перегрівання при перевантаженнях і к.з. Для автоматичних вимикачів з тепловими розчіплювачами чутливість захисту перевіряють за співвідношенням

$$I_{к.з.} / I_{н.т} \geq 3 \quad (8.41)$$

Для автоматичних вимикачів із електромагнітними розчіплювачами і номінальним струмом до 100А цю перевірку виконують за формулою [14].

$$I_{к.з.} / I_{ем} \geq 1,4 \quad (8.42)$$

де $I_{к.з.}$ – струм короткого замикання в кінці ділянки яку захищає даний вимикач.

Вид к.з. для визначення струму $I_{к.з.}$ беруть такий, при якому цей струм має найменше значення, тобто частіше всього це струм однофазного короткого замикання.

Розрахунки показують, що з достатньою для практики точністю $I_{к.з.}$ приймають (10-11) кратним значенням по відношенню до номінального струму навантаження захищеної ділянки мережі, тобто

$$I_{к.з.} \geq (10 - 11)I_{ном.} \quad (8.43)$$

Задача 8.8. Розрахувати необхідні параметри та вибрати автоматичний вимикач, замість запобіжника FU1 для захисту ділянки кола асинхронного двигуна М1 від коротких замикань (рис.8.22)

Розв'язання.

За попередніми розрахунками для асинхронного двигуна потужністю 7 кВт (див. задача 8.7, рис 8.22): номінальний струм двигуна $I_{ном} = 14,4A$; максимальний струм $I_{макс} = I_{ном} \cdot k_i = 14,4 \cdot 5,5 = 80A$; довготривалий допустимий струм вибраної електропроводки перерізом 6 мм² $I_{доп} = 50A$.

2. Визначаємо струм електромагнітного розчіплювача $I_{ем}$ автоматичного вимикача за формулою (8.35)

$$I_{ем} \geq k_n \cdot I_{макс} = 1,25 \cdot 80 = 100A.$$

3. Вибираємо автоматичний вимикач типу АЗ114/5 із параметрами: $I_{ном} = 100A$, $I_{ем} = 100A$.

4. Перевіряємо чутливість захисту автоматичного вимикача від коротких замикань, формула (8.42)

$$\frac{I_{к.з.}}{I_{ем}} \geq 1,4 ,$$

$$\frac{10I_{ном.}}{100} = \frac{10 \cdot 14,4}{100} = 1,44 > 1,4 .$$

Умова виконується.

5. Згідно з формулою (8.38) для автоматичних вимикачів, що мають тільки електромагнітні розчіплювачі, повинна виконуватися умова:

$$\frac{I_{ем}}{I_{доп}} \leq 4,5$$

$$\frac{100}{500} = 2 < 4,5$$

Умова виконується.

6. Таким чином замість запобіжника FU1 (Рис. 8.22) для захисту двигуна М1 від коротких замикань вибираємо автоматичний вимикач типу АЗ114/5 з номінальним струмом 100А і номінальним струмом електромагнітного розчіплювача також 100А.

Задача 8.9. Мережа освітлення напругою 220В (Рис. 8.23) складається із трьох груп світильників EL1, EL2, EL3 з відповідними навантаженнями $P_1 = 5,4\text{кВт}$, $P_2 = 6\text{кВт}$, $P_3 = 3,6\text{кВт}$.

Мережа повинна бути захищена тільки від струмів короткого замикання автоматичними вимикачами.

Розрахувати та вибрати відповідні апарати захисту та марку і переріз живильних провідників.

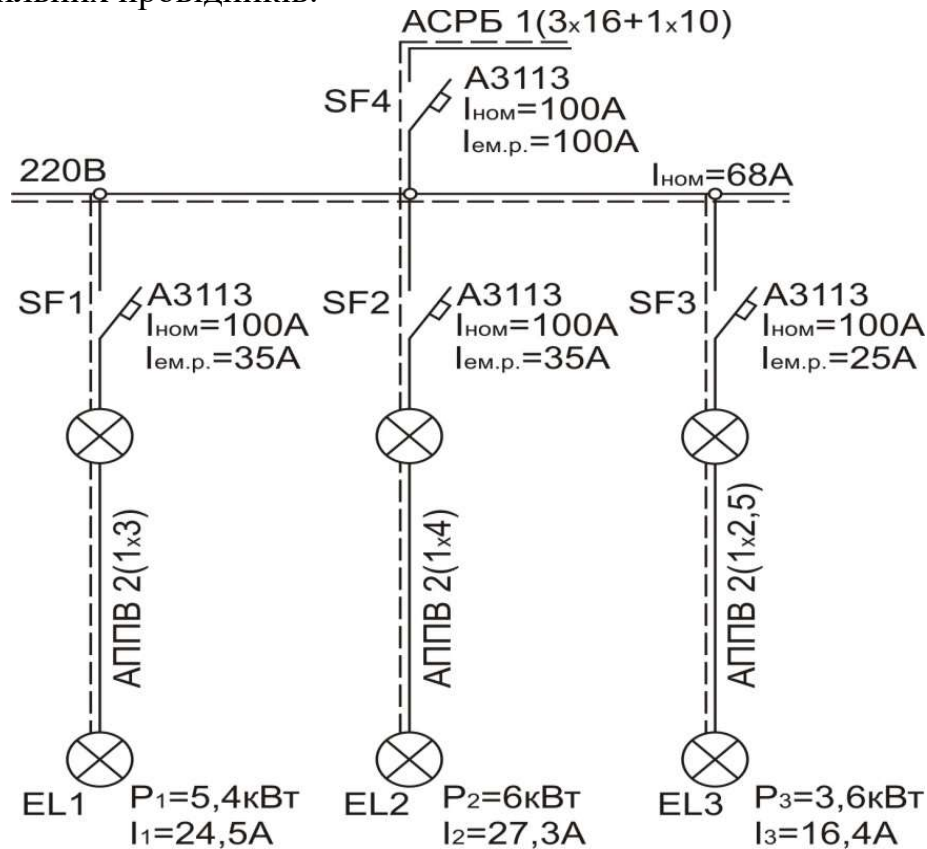


Рис. 8.23. Принципова електрична схема освітлювальної мережі

Розв'язання.

1. Розрахунок робочих (номінальних) струмів

а) номінальний струм лінії EL1

$$I_{ном1} = \frac{P_1 \cdot 10^3}{U_\phi} = \frac{5,4 \cdot 10^3}{220} = 24,5\text{A}$$

б) номінальний струм ліній EL2

$$I_{ном2} = \frac{6 \cdot 10^3}{220} = 27,3\text{A}$$

в) номінальний струм ліній EL3

$$I_{ном3} = \frac{3,6 \cdot 10^3}{220} = 16,4\text{A}$$

г) загальний струм навантаження

$$I_{ном} = I_{роб.} = I_{ном1} + I_{ном2} + I_{ном3} = 24,5 + 27,3 + 16,4 = 68 A.$$

2. Вибір автоматичних вимикачів.

За номінальною напругою $U_{ном}$ автоматичні вимикачі повинні більше або дорівнювати 220В.

Оскільки освітлювальна мережа захищається тільки від коротких замикань, то струм електромагнітного розчіплювача апарата захисту визначається за умови (8.35):

– Автоматичний вимикач SF1

$$I_{ем.1} \geq 1,25 \cdot 24,5 \geq 30,6 A$$

– Автоматичний вимикач SF2

$$I_{ем.2} \geq 1,25 \cdot 27,3 \geq 34 A$$

– Автоматичний вимикач SF3

$$I_{ем.3} \geq 1,25 \cdot 16,4 \geq 20,5 A$$

– Автоматичний вимикач SF4

$$I_{ем.4} \geq 1,25 \cdot 68 \geq 85 A$$

Вибираємо автоматичні вимикачі типу А3113/1 з електромагнітним розчіплювачем.

$$SF1 - A3113, /1 I_{ном} = 100 A, I_{ем.розч.} = 35 A;$$

$$SF2 = A3113, /1 I_{ном} = 100 A, I_{ем.розч.} = 35 A;$$

$$SF3 = A3113, /1 I_{ном} = 100 A, I_{ем.розч.} = 25 A;$$

$$SF4 = A3113, /1 I_{ном} = 100 A, I_{ем.розч.} = 90 A.$$

3. Розрахунок і вибір живильних проводів.

3.1. Провід живильної мережі групи світильників EL1.

Оскільки освітлювальна мережа захищається тільки від коротких замикань, то в разі захисту автоматичними вимикачами з електромагнітним розчіплювачем, повинна виконуватися умова (8.38)

$$I_{ем.розч.} \leq 4,5 I_{дон}$$

Номінальний струм лінії EL1 $I_1 = 24,5 A$.

За таблицею Д 2.2. вибираємо провід з алюмінієвими жилами площиною поперечного перерізу струмопровідних жил прокладених відкрито $3 мм^2$ з тривало допустимою силою струму $I_{дон} = 27 A$.

Струм електромагнітного розчіплювача SF1, $I_{ем.р} = 35 A$. Отже

$$\text{відношення } I_{ем.розч.} / I_{дон} = \frac{35}{27} = 1,29 < 4,5.$$

Умова 8.38 виконується.

Вибираємо провід марки АППВ2(1×3) – провід з алюмінієвими жилами, плоский з роздільною основою у полівінілхлоридній ізоляції.

3.2. Провід живильної мережі групи світильників EL2.

Номинальний струм лінії EL2 $I_2 = 27,3A$.

Аналогічно попередньому вибираємо провід з алюмінієвими жилами з площиною поперечного перерізу струмопровідних жил 4мм^2 з тривало допустимою силою струму $I_{\text{дон}} = 32A$.

Струм електромагнітного розчіплювача SF2=35A, тоді $35/32=1,09 < 4,5$.

Вибираємо для прокладання провід АППВ2(1×4).

3.3. Провід живильної мережі групи світильників EL3.

Номинальний струм лінії EL3 $I_3 = 16,4A$.

За таблицю Д.2.2. вибираємо такий же провід з алюмінієвими жилами з площиною поперечного перерізу $S_3 = 2,5\text{мм}^2$ з тривало допустимою силою струму $I_{\text{дон}} = 24A$.

Струм електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача SF3 $I_{\text{ем.р}} = 25A$.

Відношення $I_{\text{ем.розч}} / I_{\text{дон}} = 25 / 24 = 1,04 < 4,5$.

Вибираємо для прокладання провід АППВ2(1×2,5).

3.4. Кабель магістральної лінії, що живить всі групи світильників.

Номинальний струм магістральної лінії $I_{\text{ном}} = 68A$.

За таблицю Д.2.4. вибираємо кабель з алюмінієвими жилами при прокладанні кабелю в землі з площиною поперечного перерізу струмоведучих жил $S_4 = 16\text{мм}^2$ і тривало допустимою силою струму 90A. З урахуванням коефіцієнта 0,92 $I_{\text{дон}} = 83A$ (кабель буде чотирижильним).

Струм електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача SF4 $I_{\text{ем.р}} = 100A$.

$$I_{\text{ем.розч}} / I_{\text{дон}} = 100 / 83 = 1,2 < 4$$

Остаточно вибираємо для прокладки в землі кабель марки АСРБ1 (3×16+1×10).

3.5. Перевірка чутливості захисту і її здатність захищати ділянку мережі від коротких замикань.

Перевірку чутливості автоматичних вимикачів виконуємо за виразом (8.42):

– чутливість автоматичного вимикача SF1

$$\frac{10I_1}{I_{\text{ем.р}_1}} = \frac{10 \cdot 24,5}{35} = 7, \quad 7 > 1,4;$$

– чутливість автоматичного вимикача SF2

$$\frac{10I_2}{I_{ем.p_2}} = \frac{10 \cdot 27,3}{35} = 7,8, 7,8 > 1,4;$$

– чутливість автоматичного вимикача SF3

$$\frac{10I_3}{I_{ем.p_3}} = \frac{10 \cdot 16,4}{25} = 6,6, 6,6 > 1,4;$$

– чутливість автоматичного вимикача SF4

$$\frac{10I_{ном}}{I_{ем.p_4}} = \frac{10 \cdot 68}{100} = 6,8, 6,8 > 1,4.$$

Як видно із розрахунків, вибрані автоматичні вимикачі мають достатньо високу чутливість.

На завершення всі розрахункові дані автоматичних вимикачів та вибраних проводів і кабелів заносимо до принципової електричної схеми освітлювальної мережі.

8.4.4.4. Захист електродвигунів від перевантажень за допомогою теплових реле та вибір магнітних пускачів

Як уже відомо, магнітні пускачі призначені для дистанційного керування трифазними асинхронними двигунами та іншими трифазними струмоприймачами. При наявності в комплекті теплових реле пускачі захищають електродвигуни від струмових перевантажень. В теперішній час промисловість випускає магнітні пускачі як у комплекті з тепловими реле так і без них. Для керування асинхронними двигунами використовують магнітні пускачі з тепловими реле типу РТ, що мають змінні нагрівальні елементи з умовними номерами, які визначають силу номінального струму ($I_{ном.тепл.}$), а в теплових реле типу ТРН, ТРП, ТРТ номінальний струм вказується на самому нагрівальному елементі (див. табл. Д 8.2).

Номінальний струм теплового елемента реле $I_{ном.тепл.}$ вибирається за умови:

$$I_{ном.тепл.} \leq I_{ном} \quad (8.44)$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм струмоприймача, що захищається або довготривалий допустимий струм провідників ділянки мережі.

Методика вибору нагрівального елемента теплового реле таке:

- за потужністю двигуна (чи за номінальним струмом) та лінійною напругою визначається потрібна „величина” магнітного пускача;
- за „величину” пускача (якщо в ньому не вказаний тип теплового реле) в каталогах чи довідниках знаходять номер нагрівального елемента, який відповідає такому значенню $I_{ном.тепл.}$, що задовольняє співвідношенню (8.44).

«Величина» магнітного пускача, як і деякі інші важливі для пожежної профілактики, в електроустановках відображені в типі пускача, яка вказана на його корпусі чи в паспорті.

Вибирають магнітний пускач за струмом чи потужністю, яку здатний комутувати цей апарат.

На рис. 8.22 зображені магнітні пускачі керування і захисту асинхронних двигунів типів ПА і ПМЕ.

На рис 8.24 показаний магнітний пускач типу ПМЕ

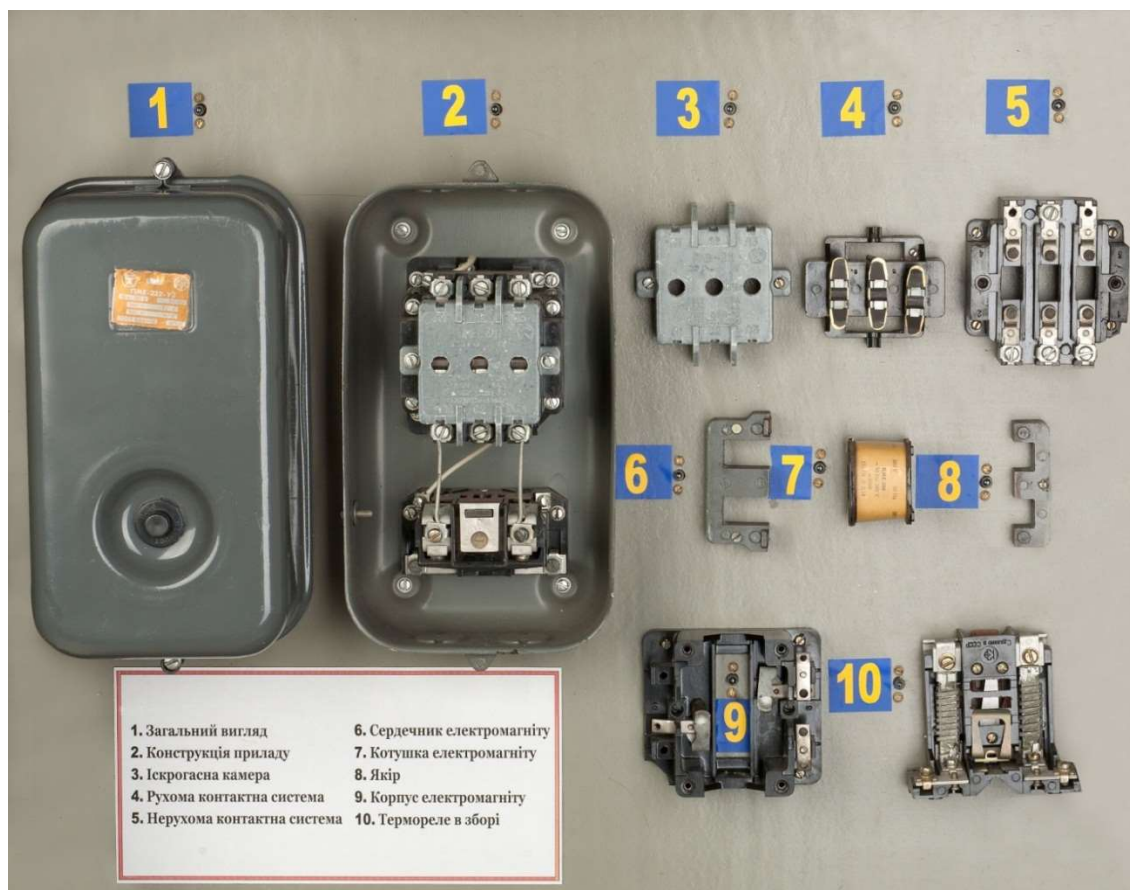


Рис 8.24. Загальний вигляд та складові елементи магнітного пускача типу ПМЕ

8.4.4.5. Температурний захист електродвигунів

У деяких галузях промислового виробництва (хімічна промисловість, сільськогосподарче виробництво, машинобудування та інші) під час експлуатації електроприводів захист електродвигунів від перевантажень та інших ненормальних режимів автоматичними вимикачами і тепловими реле не задовольняє вимогам високої надійності. Для ряду електроприводів з важкими умовами роботи (транспортери, деякі металорізальні верстати, двигуни компресорів високого тиску, роздавачі та

змішувачі кормів, відповідальні вантажно-підйомні механізми з інтенсивним режимом роботи, тощо) застосовується температурний захист двигунів. При цьому контролюється основний фактор, що може спричинити вихід із ладу двигуна – температура його обмоток.

Вбудований температурний захист призначений для вимикання електродвигуна при: тривалих перевантаженнях, неправильних процесах пуску і гальмування, підвищеній частоті вмикань, обриві фази, коливаннях напруги в межах $(0,7-1,1)U_n$; заклинюванні ротора і підвищеній температурі навколишнього середовища.

Для здійснення температурного захисту в лобові частини обмоток електродвигунів вбудовують термочутливі елементи – позистори (терморезистори із позитивним температурним коефіцієнтом опору). Позистори розміщують по одному на кожну фазу обмотки статора (всього три), всі вони з'єднуються послідовно і загальних два кінці виводяться на клемну колодку затискачів двигуна за маркуванням T1 і T2.

Опір трьох послідовно з'єднаних позисторів повинен бути в межах $120-450\text{ Ом}$ при температурі $+20 \pm 5^\circ\text{C}$, а при температурі, що відповідає перевантаженню двигуна, – більше 4000 Ом . Під час вимірювання опору кола датчиків температури можна прикладати напругу не більше $2,5\text{ В}$ (на затискачі T1 і T2).

Датчики температури вмикають у схему контролюючого приладу (УВТЗ-1, УВТЗ-1М, УВТЗЧБ та ін.), який підсилює сигнал від температурних датчиків і перетворює його на сигнал для керування електромагнітними пускачами серій ПМЛ, ПМА та інших.

8.4.5. Пожежна небезпека електроприводів

Як уже відмічалось, електропривод являє собою сукупність засобів для перетворення електричної енергії в механічну, включаючи електричну мережу живлення, апарати керування, захисту і автоматизації, електромеханічний перетворювач – електродвигун та перетворювальний пристрій (в переважній більшості механічний).

Кожна із складових електроприводу, за відповідних непередбачених умов, може стати можливою причиною виникнення пожежі.

Пожежна небезпека мережі живлення.

Силова мережа живлення електропривода в умовах промислового виробництва, як правило, виконується силовими кабелями або проводами, прокладеними в металевих трубах або в металевих рукавах.

Силові кабелі, в залежності від характеристики і зони класу приміщення, можуть бути прокладені відкрито по будівельних та металевих конструкціях з відповідними кріпильними виробами, або ж бути схованими у підлогах, стелях, стінах, під штукатуркою, в коробах і т.п.

Пожежна небезпека кабелів залежить від пожежонебезпечних властивостей матеріалів, із яких вони виконані, від конструкції кабелю, рівня навантаження та часу його використання.

Останнім часом на промислових підприємствах в силових мережах напругою до 1000В стаціонарних установок в основному використовують силові кабелі з ізоляцією жил і оболонки, виконаних із поліетилену, полівінілхлоридного пластикату, гуми.

Разом з цим нагрівостійкість цих матеріалів не така уже й висока (нагрівостійкістю називається здатність електроізолюючих матеріалів і виробів без шкоди для них як короткочасно, так і довготривало витримувати вплив високої температури, а також різких змін температури).

Матеріали, що застосовуються для ізоляції струмопровідних виробів за величиною довготривалої робочої температури, підрозділяються на класи нагрівостійкості (див. табл.8.1).

Так наприклад, поліетилен і поліхлорвініл мають нагрівостійкість $60-70^{\circ}\text{C}$ їх температура займання 360°C . При нагріванні полівінілхлоридного пластикату до $160-175^{\circ}\text{C}$ відбувається його розм'якшення, а при нагріванні до температури $220-250^{\circ}\text{C}$ – розкладання. При температурах 560°C і вище полівінілхлорид починає горіти кіптявим полум'ям, гума займається при температурі 220°C .

Найбільш розповсюдженими причинами нагрівання та спалаху ізоляції кабельної мережі являються перевантаження і короткі замикання.

Перевантаження – вид аварійного режиму, коли струм у мережі значно перевищує допустимий (за умовами нагрівання) для даного перерізу жил кабелю (провідника). При значній величині перевантаження тривалість аварійного режиму (до спрацювання захисту або перегорання струмоведучої жили) може бути сумірною з тривалістю дії струму короткого замикання, а це вже прямий шлях до займання ізоляції.

В електроприводах явища перевантаження виникають через механічні перевантаження на валу приводного двигуна за технологічних причин, при роботі асинхронного двигуна на двох фазах (у випадку втрати однієї фази), великі пускові струми при невдалих чи частих пусках двигуна, коливання або зниження напруги у мережі живлення.

Коротке замикання, коли опір між двома струмопровідними проводами дорівнює 0 – найбільш небезпечний аварійний режим, який може привести до займання ізоляції не тільки в точці короткого замикання, а й по всій довжині живильного кабелю чи проводу у випадку відсутності або невдало виконаного електричного захисту.

При стійкому (металевому) короткому замиканні у точці короткого замикання температура нагрівання досягає декількох тисяч градусів, в результаті не тільки займається ізоляція, а й розплавляється метал, виникає

велика кількість іскор і розплавлених часток металу, які здатні запалити близько розташовані спалимі речовини і матеріали.

Пожежна небезпека електричних проводок в металевих трубах.

У багатьох випадках у виробничих приміщеннях ізольовані проводи і неброньовані кабелі з метою запобігання механічних пошкоджень та запобігання пожеж від аварійних режимів прокладаються в металевих трубах і металорукавах, а в вибухонебезпечних зонах, згідно ПБЕ [5. п.4.8.11] таке прокладання є обов'язковим.

Вважається, що використання металевих труб захищає навколишнє середовище і горючі матеріали від джерела запалювання, що утворюється при аварійних режимах. Проте на практиці при дослідженні причин пожеж на місці їх виникнення знаходять металеві труби або їх залишки, в яких були прокладені проводки, зі слідами пропалів, що свідчить про дію струмів короткого замикання аварійного режиму. Такі явища часто спостерігаються на згинах труб при вводі живлення в будівлі і споруди, а також при вводі проводів до клемної коробки електродвигунів, закритих розподільчих пристроїв і т.п. У таких місцях найчастіше виникає пошкодження ізоляції жил провідників при їх протягуванні в труби, а також неякісному проведенні монтажних робіт. Металеві труби і металорукава згідно вимог ПБЕ з обох кінців заземляються або зануляються і коли ізоляція провідника втрачає свої властивості і він доторкається до стінки металеві труби між струмоведучим провідником і трубою виникає стійке металеве коротке замикання, що й призводить до пропалів у трубах і появи джерела запалювання, якщо ця ділянка мережі має недосконалий або загрубілий електричний захист. Про пожежну небезпеку електричних проводок у металевих трубах див. також в [12].

Пожежна небезпека електромагнітних пускачів.

Із апаратів керування електроприводом значну пожежну небезпеку викликають магнітні пускачі. Пожежна небезпека пояснюється надмірним підвищенням температури деталей апарату, яке відбувається в результаті міжвиткових замикань в котушці, послабленні контактних з'єднань, забруднення контактних поверхонь. Перегрівання котушки призводить до збільшення активного опору проводу котушки, зменшенню струму і сили, що притягує осердя електромагніту, що в свою чергу збільшує повітряний зазор між якорем і осердям і ще більшому перегріванню котушки і займанню ізоляції її обмотки. На практиці доказано, що причиною значного перегрівання котушки може бути навіть незначне збільшення (на 5% вище номінального значення) напруги. Перегрівання силових контактів магнітних пускачів може відбутися при роботі в неоптимальному режимі, внаслідок короткого замикання, а також через їх знос. Якщо такі контакти своєчасно не замінити, то вони можуть приваритися один до одного, що приведе до повного виходу із ладу пускача.

Нерідко пожежі від пускорегулювальної апаратури виникають в результаті коротких замикань проводів на корпус в містах їх вводу, а також внаслідок міжвиткових замикань котушок магнітних пускачів. На електричну і механічну міцність елементів електропроводу і котушок впливають механічні дії у вигляді вібрацій і струсів, які визивають руйнуючі механічні напруження в деталях. Таким чином, в процесі експлуатації у магнітному пускачі так же, як і в будь-якому електричному апараті, окремі вузли і деталі зношуються і виходять із ладу. Виникають порушення регулювання, послаблюються контактні з'єднання, відбувається природне старіння ізоляції і т.п. Все це при відповідних умовах може привести до пожежі.

Пожежна небезпека електродвигунів.

Електродвигун як і будь-який електротехнічний пристрій у системі електроприводу, може бути джерелом виникнення пожежі через надмірне нагрівання поверхні по електричним причинам – обмотки статора, та механічним – підшипники в яких обертається ротор. Крім того в результаті коротких замикань, або великих перехідних опорів на затискачах можуть виникнути електричні іскри і дуги.

Пожежна небезпека електричних машин досить докладно розглядалась раніше (див. розділ 5 п.5.5)

8.4.6. Пожежно-профілактичні заходи

Незалежно від того, що складає і що визначає пожежну небезпеку електрообладнання електроприводу заходи по запобіганню аварійних ситуацій і пожеж в основному залежать від проектувальників, монтажників і експлуатаційників, які повинні ясно уявляти собі суть пожежної небезпеки електрооб'єктів, які вони обслуговують, монтують або проектують. На всіх етапах повинні бути чітко виконані вимоги ПБЕ [5], ПУЕ[6], Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [13], та інших державних і галузевих нормативних документів.

Пожежна безпека силової мережі і мережі керування забезпечується дотриманням наступних основних вимог:

- правильним вибором виду електропроводки і способу її прокладання в залежності від розташування електрообладнання (розподільчий щит – магнітний пускач-двигун);

- відповідність виду електропроводки і характеристик проводів, кабелів і труб, що використовуються допустимим способом прокладання по підтримуючим підвалинам, конструкціям, у підлозі, в підвішеному стані на тросі і т.п.;

- виконанням захисту електричних мереж відповідно до глави 3.1. ПУЕ;

– підтриманням опору ізоляції струмоведучих жил і частин не нижче величини, регламентованої ПУЕ (наприклад у мережах напругою до 1000В повинно бути не нижче 0,5МОм на фазу);

– забезпеченням якісного контакту в місцях приєднання проводів до приладів і апаратів, що досягається правильним вибором розміру гвинтових затискачів у залежності від перерізу провідників.

Приєднання жил проводів, кабелів до виводів клемної коробки двигунів слід виконувати за допомогою наконечників або затискачів. Однодротяні жили перерізом до 16мм² слід приєднувати до штирьових затискачів згинанням жили в кільце. При цьому жили із алюмінію повинні бути зачищені і покриті кварцево-вазелиною пастою. Однодротяні жили слід приєднувати до затискачів з використанням наконечників для опресовки. Багатодротяні мідні жили перерізом до 6мм² допускається приєднувати без наконечників з попереднім розпаянням жил. З'єднання алюмінієвих жил здійснюється тільки зварюванням, паянням і опресуванням.

Велике значення, з точки зору попередження пожеж має правильний підбір і установлення відповідних апаратів захисту. При цьому кожний апарат захисту повинен мати напис, що вказує значення номінального струму апарату, уставка розчіплювача і номінального струму плавкої вставки запобіжника, необхідних для захисту мережі чи електродвигуна. Написи рекомендується наносити на апараті або схемі, що розташована поблизу міста установки апаратів захисту.

Всі електричні мережі захищаються від струмів короткого замикання запобіжниками або автоматичними вимикачами (з мінімальним часом вимикання). При цьому необхідно, щоб апарати захисту окремих ділянок мережі не вимикали електроустановки при короткочасних перевантаженнях (пускові струми, самозапуск, короткочасні зміни напруги і т.п.).

Електрична живильна мережа, виконана відкрито прокладена незахищеними проводами з горючою ізоляцією, і освітлювальні електричні мережі всередині службово-побутових приміщень, виконані захищеними проводами і проводами, покладеними в трубах або в неспалимих будівельних конструкціях, а також мережі всіх видів у вибухонебезпечних зонах і силові мережі на промислових підприємствах, коли за умов технологічного процесу або режиму роботи може виникнути довготривале перевантаження проводів і кабелів повинні бути захищені від перевантаження.

Апарати захисту, які є засобами, що забезпечують безпеку експлуатації і попередження пожеж, при неправильному монтажі і неякісному обслуговуванні можуть самі стати причиною пожежі або

вибуху. Розрив електричного кола в момент спрацювання апарату захисту супроводжується іскроутворенням і появою електричної дуги.

У плавких запобіжниках, автоматах і реле струмоведучі частини в процесі експлуатації нагріваються при наявності неякісних (поганих) з'єднань, що також являють собою пожежну небезпеку.

Установка апаратів захисту виконується таким чином, щоб виключити можливість попадання іскор на спалимі матеріали і предмети. Допускається, при необхідності, приймати довжину ділянки між лінією живлення і захисним апаратом до 3м. Провідники на цій ділянці повинні прокладатися в трубах або мати негорючу оболонку.

Для електродвигунів передбачають захист від коротких замикань, а в окремих випадках від перевантаження і мінімальної напруги. Електродвигуни постійного струму при необхідності захищають ще від надмірного перевищення частоти обертання.

Захист електродвигунів від перевантаження встановлюють у тому випадку, якщо можливе систематичне перевантаження механізму, пов'язане з технологічним процесом, а також при необхідності обмеження пускового періоду при зниженні напруги під час важких умов пуску або самозапуску. В подібних випадках необхідна деяка витримка часу, а через це в якості апарату захисту зазвичай використовують теплові реле магнітних пускачів.

При захисті живильних мереж підбір апаратів і запобіжників здійснюється відповідно вимог ПУЕ. Установка апаратів захисту у вибухонебезпечних зонах категорично заборонена, а в пожежонебезпечних зонах (у залежності від класу) їх розташовують в закритих (ущільнених) або захищених шафах. Це пояснюється тим, що у вибухонебезпечних зонах можливе утворення вибухонебезпечних сумішей, для яких електричні іскри і дуги апаратів захисту є достатнім джерелом займання. В пожежонебезпечних зонах горючий пил може проникати всередину апаратів, осідати на їх струмоведучих частинах і також може зайнятися.

Не рекомендується розташовувати апарати захисту в сирих приміщеннях і приміщеннях з хімічно активним середовищем, так як при наявності в повітрі підвищеної кількості вологи, парів, кислот, лугів і т.п. швидко відбувається окислення апаратів, що в підсумку призводить до передчасного виходу їх із ладу.

Запитання та завдання для самоконтролю

1. Приведіть структурну схему поодинокого електроприводу та поясніть призначення складових схеми.
2. Приведіть рівняння руху електроприводу та поясніть режими його роботи.
3. Що таке момент інерції та його розмірність?

4. Покажіть (накресліть) кінематичну схему механічної частини електроприводу та поясніть зведення моментів і сил, діючих в системі, до валу двигуна.
5. Які фактори впливають на тепловий режим електроприводу? Основні вимоги щодо вибору потужності електродвигунів.
6. Поясніть метод вибору потужності електричних двигунів для довготривалого незмінного навантаження (режим S1).
7. Теж саме для довготривалого змінного навантаження (режим S6).
8. Теж саме для короткочасного режиму роботи (режим S2).
9. Що таке повторно-короткочасний режим роботи електроприводу. Особливості вибору потужності двигуна для цього режиму (режим S3).
10. Які схеми керування електроприводом Ви знаєте. Приведіть конкретну схему.
11. Накресліть схему пуску і зупинки асинхронного двигуна з коротко замкнутим ротором.
12. Для чого необхідно знати механічні характеристики електричних двигунів і виробничих механізмів?
13. Порівняйте переваги і недоліки двигунів змінного струму – асинхронних, синхронних і двигунів постійного струму при їх використанні в системах електроприводу.
14. Які Ви знаєте засоби захисту електродвигунів від аварійних режимів?
15. Як правильно вибрати магнітний пускач для керування і захисту асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
16. Поясніть пожежну небезпеку електроприводів та протипожежні заходи.

Післямова

Отже, Ви, шановний читачу, закінчили ознайомлення, а ще краще, якщо в деякій мірі опанував матеріал, викладений у нашому навчальному посібнику. Якщо Ваші знання з електротехніки та електротехнічних пристроях стали більш вагомими, то ця книжка, цей посібник, буде також Вам корисним в подальшому навчанні та в майбутній практичній діяльності.

Навчальний посібник підготовлено для здобувачів вищої освіти галузі знань 26 «Цивільна безпека», працівників цивільного захисту та інших інженерно-технічних працівників, які здійснюють нагляд і контроль за безпекою та технічним станом електроустановок.

У посібнику було розглянуто:

- 1) Основні закони електротехніки, кіл постійного та змінного струмів із докладним розглядом теплової дії струму;
- 2) Магнітні кола, електромагнітні взаємодії та явища електромагнітної індукції;
- 3) Електромеханічні та електростатичні перетворювачі електричної енергії – електричні машини та трансформатори, будову використання трифазного асинхронного двигуна, як найбільш розповсюдженого у виробництві виду електричних машин;
- 4) Електричний привод в сукупності з засобами керування та захисту електродвигунів, приведені методики вибору потужності електродвигунів у різних режимах роботи;
- 5) Електричну безпеку людини та пристроях захисту людини від ураження електричним струмом.

При цьому автори намагалися викласти матеріал посібника таким, щоб він був доступним і зрозумілим для читача.

Пропанований посібник також може бути використаний аспірантами, магістрами, які займаються питаннями удосконалення електротехнічних пристроїв і електроустановок, а також з успіхом використаний інженерами і техніками для поповнення своїх знань в області електротехніки. Велику допомогу при вивченні окажуть задачі, які приводяться в тексті.

Звісно, видання не претендує на вичерпність у висвітленні основ сучасної електротехніки та її практичного використання у виробництві. У викладенні матеріалу посібника у деяких випадках зустрічаються посилання на електротехнічні пристрої застарілих зразків. Автори врахували, що на сьогодні таке обладнання являється матеріально-технічною базою навчальних лабораторій і промислових електроустановок.

Разом з тим електротехніка, як прикладна наука, динамічно розвивається. На зміну контактним електротехнічним пристроям приходять

безконтактні пристрої і пристрої на основі потужних напівпровідникових статичних перетворювачів. Впроваджуються у виробництво нові типи електричних машин. Типовими представниками яких являються безщіткові двигуни постійного струму, крокові двигуни, нові серії асинхронних двигунів.

Розвиток напівпровідникової й електронної техніки дозволяють утворювати нові системи керування і захисту електричних мереж, електроприводів і багатьох електрофікованих машин і механізмів.

Дуже перспективними являються тенденції широкого використання у виробництві промислових роботів. Їх розробки і дослідження поклали початок нового науково-технічного напрямку – робототехніки. Не виключено, що найближчим часом промислові роботи стануть невід'ємними помічниками при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Отже, основними напрямами успішного оволодіння знаннями в галузі електротехніки являються в першу чергу поліпшення матеріально-технічної навчальної бази, удосконалення програм і методик навчання, спрямованих на придбання курсантами та студентами глибокої електротехнічної підготовки, відповідно до сучасних вимог виробництва.

Успішне вирішення цих задач потребує подальшого удосконалення навчально-методичної літератури, в тому числі, запропонованого навчального посібника.

Бажаємо Вам успішного навчання!

Автори.

Список використаної та рекомендованої літератури:

1. Іванова М. П. Загальна електротехніка – К, 1969.
2. Кулаков О.В., Росоха В.О. Електротехніка та пожежна профілактика в електроустановках. – Харків, 2010.
3. Шадрін А. А., Коваль М. С. Профілактика пожеж в електроустановках. – Львів, 2001.
4. Правила будови електроустановок (ПБЕ). Електрообладнання спеціальних установок. – К, 2001.
5. Довідник сільського електрика за редакцією к.т.н. В. С. Олійника. – К: Урожай, 1989.
6. Ванін В.В., Блюк А.В., Гнітецька Г.О. Оформлення конструкторської документації. – К: Каравела, 2003.
7. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К: ДНАОП, 1998.
8. Охорона праці: Навчальний посібник за редакцією Бедрія Я. І. – К: ЦУЛ, 2002.
9. Довідник молодого фахівця пожежної безпеки під редакцією Кулешова М. М. – Харків, 2002.
10. Баракін О. Г., Квашніна О. В., Кулініч О. І. Пожежно-технічне обстеження електрообладнання об'єктів: Навчальний посібник. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2004.
11. Лега Ю. Г., Ситнік О. О., Кулініч О. І. Електричні машини в системах електропривода: питання теорії і практики. – Черкаси: ЧДТУ, 2003.
12. Баракін О. Г., Кулініч О. І., Квашніна О. В. Електричні машини у виробництві та пожежна безпека при їх використанні. – Черкаси: АПБ ім.Героїв Чорнобиля, 2009.

Навчальне видання

О. М. Землянський, К. І. Мигаленко, П. І. Заїка, В. І. Томенко,
С. С. Тарасов, О. О. Зобенко, М. Г. Томенко

СПЕЦІАЛЬНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Навчальний посібник

Підписано до друку 28.11.2022.
Обл.-вид. арк. 21,28. Ум. друк. арк. 33,75.
Замовлення № 30.
ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034