

## РОЗРОБКА ІЄРАРХІЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЇ

М.В. Новожилова, О.І. Чуб, Ю.В. Михайловська, Р.В. Гудак, Р.С.Мележик

### WORKING OUT HIERARCHIC STRATEGY OF ENHANCEMENT OF THE TERRITORY TECHNOLOGICAL SAFETY LEVEL

M. Novozhylova, O. Chub, Yu. Mikhaylovska, R. Gudak, R. Melezhik

*З використанням методології управління програмами розвитку складних організаційно-технічних та соціальних систем проведено розробку оптимізаційної математичної моделі та методу розв'язання задачі підвищення рівня техногенної безпеки регіону шляхом складання багатоетапної програми розвитку територіальної системи техногенної безпеки з урахуванням її ієрархічної структури.*

*Була проведена оцінка рівня техногенної безпеки окремих потенційно небезпечних об'єктів (перший рівень ієрархії), які розміщуються на території регіону та здійснюють головний внесок у рівень його небезпеки, на основі чого побудована оцінка рівня техногенної безпеки регіону (другий рівень ієрархії).*

*Підвищення рівня техногенної безпеки регіону виконувалося шляхом підвищення рівня техногенної безпеки окремих потенційно небезпечних об'єктів в рамках фінансування, що виділяється по етапах програми розвитку територіальної системи техногенної безпеки. Для цього була сформульована та розв'язана оптимізаційна задача, яка відноситься до класу задач цілочисельного (булевого) програмування.*

*Для розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі в статті запропоновано чисельний метод, заснований на застосуванні адитивного алгоритму Балаша, що дозволило отримати розв'язок, близький до глобального оптимуму задачі. В рамках запропонованого методу розв'язання розроблені правила відсікання безперспективних вершин дерева розв'язків задачі та проаналізовані процедури спуску та підйому по дереву розв'язків задачі.*

*В статті проведено чисельну реалізацію запропонованого методу розв'язання оптимізаційної задачі підвищення рівня техногенної безпеки регіону. У якості регіону розглядалася територія, де розміщуються чотири потенційно небезпечні об'єкти, у кожного з яких виділені чотири рівня безпеки. В результаті розв'язку оптимізаційної задачі була розроблена програма розвитку системи техногенної безпеки території, яка складалася з трьох етапів. В рамках кожного етапу було отримано оптимальний розподіл ресурсів (коштів), що виділяються на розвиток системи техногенної безпеки окремих потенційно небезпечних об'єктів регіону.*

**Ключові слова:** *оптимізаційної математичної моделі, підвищення рівня техногенної безпеки регіону, програми розвитку*

#### **1. Вступ**

Удосконалення структури і параметрів складних організаційно-технічних та соціальних систем на сучасному етапі розвитку науки і суспільства базується на методології управління програмами розвитку систем. При цьому результат програми не є детермінованим, оскільки залежить від турбулентного оточення, яке вносять невизначеність у процес управління [1]. Особливої актуальності урахування невизначеності зовнішнього і внутрішнього середовища програми набуває для масштабних і тривалих програм. До цього класу належать державні цільові програми розвитку територіальних систем цивільного захисту, як основної компоненти Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС) України, зокрема, територіальних систем техногенної безпеки (ТСТБ).

Турбулентність зовнішнього середовища програми визначається динамічністю економіки країни, критичним технічним станом обладнання потенційно небезпечних об'єктів (ПНО), високим рівнем амортизації власних основних фондів ТСТБ в умовах граничних

ресурсних обмежень, в тому числі, зменшення фінансування повсякденного режиму функціонування підрозділів ДСНС України та чисельності кадрового забезпечення, підвищення вимог до регіональної системи цивільного захисту, як до її складу, так і до якості управління. У сукупності це є причиною низького рівня об'єктивності при реалізації визначених заходів стосовно формування оптимального складу та структури ТСТБ і обумовлює необхідність створення і реалізації нових механізмів управління програмами розвитку системи.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Критичний аналіз сучасних літературних джерел дозволив структурувати науковий доробок за проблемою дослідження. Фундамент сучасної теорії управління програмами розвитку складних систем закладений в ґрунтовних дослідженнях Н.С. Бушуєвої [2] та Н. Tanaka [3].

Питання адаптивного управління програмами розвитку територіальних систем техногенної безпеки докладно розглянуті в [4]. Програма розвитку системи нерозривно пов'язана з поняттям його зовнішнього і внутрішнього середовища, яким притаманна властивість турбулентності [5] тобто складної, неупорядкованої в часі і просторі поведінки дисипативного середовища, деталі якої не можуть бути відтворені на великих інтервалах часу при скільки завгодно точному завданні початкових і граничних умов [6]. Фундаментальний аналіз поняття турбулентності стосовно до предметної галузі управління програмами розвитку систем проведено в монографії С.Д. Бушуєва [7].

Побудові та аналізу моделей системи техногенної безпеки регіону присвячено дослідження [8]. У ньому визначено територіальну систему техногенної безпеки як відкриту організаційно-технічну систему, що взаємодіє із зовнішнім середовищем для отримання різних ресурсів, перетворюючи ці ресурси в елементи внутрішнього середовища системи. Частина ресурсів переробляється, продукуючи продукти та послуги ТСТБ, які в свою чергу передаються в зовнішнє середовище [9].

Розробці методів оптимізації системи техногенної безпеки регіону для підвищення рівня техногенної безпеки території присвячено [10].

Необхідність врахування таких особливостей регіональних СТБ як ієрархічність структури (об'єктовий рівень, регіональний рівень), можливість зміни режиму функціонування (повсякденний режим, режим надзвичайної ситуації (НС), змішаний характер фінансування, імовірнісний характер виникнення НС, вкрай ускладнюють застосування існуючих моделей та методів удосконалення їх структури та параметрів [11].

Крім того, в даний час не існує універсального методу оцінки рівня техногенної безпеки ПНО, які вносять основний вклад в загальний рівень техногенної безпеки регіону [12]. Така ситуація зумовлена великою кількістю і різномірністю ПНО, що характеризуються власними множинами властивостей і параметрів, а також небезпечних факторів надзвичайних ситуацій, виникнення яких на ПНО є найбільш вірогідним [13]. Техногенна безпека в цілому – це поняття багатофакторне, воно включає, принаймні, пожежну безпеку, а також хімічну, радіаційну та інші види безпеки [14].

Таким чином, підвищення ефективності управління програмами розвитку територіальної системи цивільного захисту за рахунок розробки конструктивних засобів адаптивного управління програмами розвитку ТСТБ, які забезпечують урахування зміни параметрів впливу зовнішнього середовища у часі, є актуальною науково-прикладною проблемою.

## **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є створення інструментальних засобів моделювання багатоетапної програми розвитку територіальної системи техногенної безпеки, що включають визначення аналітичної оцінки поточного рівня техногенної безпеки регіону та побудову методу підвищення рівня безпеки.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

- визначити узагальнену оцінку техногенної безпеки регіону;

- розробити двокритеріальну оптимізаційну задачу підвищення рівня техногенної безпеки регіону;
- побудувати метод підвищення рівня безпеки регіону на основі розробки багатоетапної програми розвитку територіальної системи техногенної безпеки з урахуванням її ієрархічної структури.

#### 4. Визначення узагальненої оцінки техногенної безпеки регіону

В основу всіх наявних методик оцінки техногенної безпеки об'єктів покладена концепція визначення чисельних значень критеріїв техногенної безпеки ПНО, які характеризують вплив небезпечних факторів техногенної НС на людину і навколишнє середовище, а також небезпеку знищення або пошкодження матеріальних цінностей [15].

В даному дослідженні побудова узагальненої аналітичної оцінки техногенної безпеки регіону базується на процедурі структурної і параметричної ідентифікації оцінки загального рівня техногенної безпеки ПНО.

Розглянемо таку постановку задачі. Є певна територія, де розташована скінчена множина  $N$  підприємств – об'єктів підвищеної небезпеки. Кожен ПНО характеризується своїм рівнем техногенної безпеки,  $\bar{y}_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . У загальному випадку  $\bar{y}_n$  являє собою вектор, компоненти якого,  $y_n^k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K_n$ , характеризують рівні різних видів техногенної безпеки.

Вимірювання рівнів техногенної безпеки і ризику реалізації різних видів небезпеки може здійснюватися як в якісних («низький», «середній», «високий»), так і в кількісних шкалах (безрозмірних або вимірних) залежно від переваг особи, що приймає рішення (ОПР). У роботі використовується цілочисельна кількісна шкала  $[0, 1, \dots, M_{\max}]$ , така, що рівень  $y_n^k$  безпеки  $k$ -го виду  $n$ -го ПНО пов'язаний з рівнем ризику  $x_n^k$  співвідношенням

$$x_n^k + y_n^k = M_{n\_max}^k.$$

Нехай при цьому відсутність  $k$ -го виду небезпеки на ПНО означає  $y_n^k = M_{n\_max}^k$ .

Тоді скалярна оцінка  $y_n$  загального рівня техногенної безпеки ПНО представляється як:

$$y_n = \min_{k=1,2,\dots,K_n} y_n^k. \quad (1)$$

Таким чином, використання скалярної оцінки рівнів  $y_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  техногенної безпеки множини ПНО регіону дозволяє побудувати інтегральну оцінку техногенної безпеки регіону у вигляді адитивної функції

$$Y = \sum_{n=1}^N \lambda_n y_n, \quad (2)$$

де  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$  – вектор оцінок значущості кожного з  $N$  ПНО території.

Відзначимо, що в залежності від переваг ОПР коефіцієнти  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$  можуть відображати рівень потенційної техногенної небезпеки для території і людини відповідно до класифікації ПНО.

#### 5. Розробка двокритеріальної оптимізаційної задачі підвищення рівня техногенної безпеки регіону

На сьогодні стан територіальних підсистем ДСНС України є таким, що необхідно передбачає виділення значних коштів у рамках створення і здійснення довготривалої багатоетапної програми забезпечення техногенної безпеки на всіх рівнях ієрархії.

Особливості планування бюджету територіальних підсистем ДСНС України, бюджету міста та області визначаються таким чином, що період планування складає один рік, тобто задача допускає дискретизацію за часом. Будемо вважати, що рівні техногенної безпеки вимірюються з дискретної шкалою з  $K$  градаціями, що відповідає прийнятій формі звітності.

Тоді можна сформулювати наступну двокритеріальну задачу:

необхідно визначити  $T$ -етапну програму підвищення рівня техногенної безпеки регіону до необхідної величини  $Y_{opt}$  з мінімальними сумарними витратами, де  $T$  – є характеристика критичного шляху (терміну) програми.

Відзначимо також такі особливості розглянутої задачі, що впливають з аналізу практичної діяльності територіальних систем ДСНС України.

Початкові рівні безпеки різних підприємств можуть бути різними:

- витрати на підвищення рівня безпеки  $n$ -го ПНО з величини  $y_n = i$  до значення  $y_n$

$= j$  в період  $t$  складають  $S_n^{ij}(t)$  одиниць;

- витрати  $C_n^i(t)$  на підтримку досягнутого рівня  $y_n = i$  безпеки ПНО не є постійними як в силу необхідності врахування інфляційних процесів, так і в силу амортизаційних витрат, необхідних для компенсації фізичного та морального зносу основних фондів підприємств і територіальної підсистеми ДСНС України. Амортизаційні витрати на всі основні фонди включаються в собівартість продукції і нараховуються зазвичай рівними частками протягом нормативного або фактичного (залежно від типу основних фондів) терміну служби. Тому далі в даній роботі приймається, що оцінка амортизаційних витрат у структурі витрат  $C_n^i(t)$  проводиться в періоді  $t = t_1$ , а в наступних періодах часу виконання програми витрати  $C_n^i(t)$  індексуються відповідно до поточного рівня інфляції;

- загальна сума витрат на підвищення рівня безпеки в цілому за регіоном для кожного періоду  $t$  обмежена величиною  $Z_t^{доп}$ .

З урахуванням вищенаведених особливостей задача така:

скласти  $T$ -етапну програму підвищення рівня безпеки регіону до максимально можливої величини  $Y^{max}$  в рамках фінансування, що виділяється по етапах.

Розмірність розглянутої задачі визначається величиною  $N \cdot T$ . Враховуючи, що, наприклад, на території Харківської області знаходиться більше 1100 ПНО, задача відноситься до класу задач комбінаторної оптимізації великої розмірності.

Припустимо, що протягом періоду часу  $[t, (t+1)]$  підвищення техногенної безпеки  $n$ -го ПНО може здійснюватися не більше, ніж на один рівень. При цьому величина витрат  $C_n^i(t)$ ,  $S_n^{ij}(t)$  може бути задана тільки для першого періоду програми забезпечення техногенної безпеки, а потім індексуватися відповідно до рівня інфляції  $r$ .

У загальному випадку, індекс інфляції являє собою вектор  $r = \{r_1, \dots, r_T\}$ . У даному дослідженні покладемо індекс інфляції  $r = 10\%$  у середньорічному обчисленні.

Матриця  $S_n(t)$  є верхньою трикутною. Елементи витрат  $C_n^i(t)$  розташовуються на головній діагоналі матриць  $S_n(t)$ ,  $n=1,2,\dots,N$ .

Елементи матриць витрат у наступні моменти часу виконання програми визначаються за правилом

$$S_n^{ij}(t) = (1 + r_t) \cdot S_n^{ij}(t-1).$$

Достатньо заповнити наддіагональні елементи матриць  $S_n(t)$ .

## 6. Побудова методу розв'язання задачі підвищення рівня техногенної безпеки території

Отже, нехай розглядається T-етапна  $\{t_1, t_2, \dots, t_T\}$  програма підвищення рівня безпеки території.

Пропонований підхід до розв'язання задачі заснований на її представленні у вигляді ряду підзадач з функціями цілі і обмеженнями більш простого виду, відповідними етапу  $t$  виконання програми. При цьому значення компонент вектора у формуються послідовно у відповідності з виконуваними ітераціями.

Таким чином,  $t$ -я ітерація методу має вигляд:

1. Розв'язання дискретної оптимізаційної задачі

$$x^* = \arg \max_{x \in D_t} F(x) = \arg \max_{x \in D_t} \sum_{n=1}^{N_t} \lambda_n (y_n^t + x_n), \quad (3)$$

де  $N_t$  – кількість компонент вектору  $y$ , що задовольняють нерівності

$$y_n \leq M_{\max},$$

область допустимих рішень  $D_t$  задається обмеженнями

$$\sum_n^{N_t} \{(1 - x_n) C_n^{y_n^t}(t) + x_n S_n^{y_n^t(y_n^{t+1})}(t)\} \leq Z_t^{\text{доп}}, \quad (4)$$

$$x_n \in \{0, 1\}, \quad n = 1, 2, \dots, N_t. \quad (5)$$

2. Визначення вектору  $y_n^{t+1} = y_n^t + x_n$ .

3. Якщо для деякого індексу  $n$   $y_n^{t+1} = M_{\max}$ , то  $N_{t+1} = N_t - 1$ .

Цей факт означає, що підприємство  $n$  досягло заданого рівня безпеки, тому на наступних етапах рішення для  $n$ -го ПНО враховуються лише витрати  $C_n^i(t)$ .

4. Визначення відповідних значень витрат

$$S_n^{ij}(t+1) = (1 + r_t) \cdot S_n^{ij}(t) \text{ и } C_n^i(t+1) = (1 + r_t) \cdot C_n^i(t).$$

5. Перехід до наступної ітерації  $t=t+1, t \leq T$ .

Функція мети  $F(x)$  у виразі (3) для конкретного етапу розв'язку містить константу

$K = \sum_{n=1}^{N_t} \lambda_n y_n^t$  і може бути записана в більш простому вигляді:

$$F(x) = \left( \sum_{n=1}^{N_t} \lambda_n x_n + K \right).$$

Оптимізаційна задача (3) – (5) відноситься до класу задач булевого програмування. Арсенал сучасних засобів прикладної математики включає множину точних і наближених методів розв'язання подібного роду задач. Оптимізаційний метод розв'язання задачі, що розвивається в даній роботі, заснований на застосуванні адитивного алгоритму Балаша [16], котрий дозволяє вже на перших кроках процесу розв'язання знайти вектор  $x^*$ , близьке до глобально-оптимального.

Суть алгоритму Балаша полягає в наступному. Розглянемо деяку підмножину  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ , в якому кожної змінної  $x_j$  поставлено у відповідність деяке значення 0 або 1. Така підмножина називається частковим розв'язком. Формально процес пошуку оптимального розв'язку можна представити у вигляді генерації деякого дерева варіантів, де кожна вершина (не кінцева) відповідає деякому частковому розв'язку, а можливі його доповнення генерують гілки двійкового дерева.

Нехай на рівні  $g$  дерева розв'язків побудований частковий розв'язок  $x_g$ ,  $g = 1, 2, \dots, J$ . Тоді змінні  $x_j$ ,  $j = g + 1, \dots, N$ , що не входять в частковий розв'язок, формують набір змінних, що мають назву доповнення відповідного часткового розв'язку. На кожній вершині  $s$ -го рівня дерева розв'язків відома нижня оцінка функції  $F^S(x)$  мети,

$$F^S(x) = \sum_{n=1}^s \lambda_n (y_n^t + x_n), \quad x_n \in \{0, 1\}.$$

Якщо враховувати тільки умови (5), то існує  $2^N$  можливих наборів значень змінних  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Багато з цих наборів значень є неприпустимими через обмеження (4) і лише досить невелике число з них є оптимальними.

Правила побудови часткового розв'язку засновані на наступних особливостях оптимізаційної задачі (3) – (5):

1. Задача (3) – (5) має тільки одне обмеження, при цьому всі коефіцієнти функції обмеження при невідомих змінних  $x$  більше нуля.

Таким чином, зміна значення невідомої  $x_n$  з 0 до 1 збільшує ліву частину нерівності (4) на величину

$$S_n^{y_n^t(y_n^t+1)}(t) - C_n^{y_n^t}(t) > 0.$$

2. Функція мети (3) є адитивною, тому з метою спрощення процесу розв'язання допускає впорядкування доданків  $\lambda_n x_n$  по зменшенню коефіцієнтів  $\lambda_n$ .

Отже, в якості нижньої оцінки  $F_{\text{opt}}^S(x)$  оптимального значення функції мети задачі можна прийняти величину  $F_{\text{opt}}^S(x) = \sum_{n=1}^s \lambda_n x_n$ , де  $s$  – кількість змінних  $x_n$ , значення яких дорівнюють 1, причому

$$\sum_{n=1}^s \{S_n^{y_n^t(y_n^t+1)}(t) - C_n^{y_n^t}(t)\} \leq Z_t^{\text{доп}}.$$

Впорядкуємо все  $2^n$  рішень за допомогою мережевої моделі  $A$ , де кожна вершина  $i$ -го шару мережі, що містить список  $M_i^1$ , представляє рішення, в якому змінні з індексами  $M_i^1$  дорівнюють одиниці, а решта – нулю.

Нехай відома нижня досягнута оцінка  $F_{\text{opt}}^S(x)$  оптимального значення цільової функції (3) і зафіксовано допустиме рішення  $(x_1, x_2, \dots, x_s, x_{s+1}, \dots, x_{N_t})$  на вершині  $x_1 = x_2 = \dots = x_s = 1, x_{s+1} = \dots = x_{N_t} = 0$ , що дає цю оцінку. Тоді має місце

**Правило 1** відсікання безперспективних вершин по обмеженню (4).

Якщо виконується умова

$$\min_{n=s+1, \dots, N_t} (S_n^{y_n^t(y_n^t+1)}(t) - C_n^{y_n^t}(t)) > Z_t^{\text{доп}} - \sum_{n=1}^s \{S_n^{y_n^t(y_n^t+1)}(t) - C_n^{y_n^t}(t)\},$$

то розглянута вершина є кінцевою (прозондованою).

При зондуванні часткового розв'язку, що містить  $s$  змінних, неявним чином перебирається  $2^{n-s}$  можливих значень.

Отже, при  $k=0$ , підмножина розв'язків складається з єдиного розв'язку  $x=0$ ; в той час як  $k$ -а підмножина складається з  $C_{N_t}^k$  рішень.

У зв'язку з таким поданням має місце ще одна особливість задачі (3) – (5). Один і той ж частковий розв'язок може бути отриманий кількома шляхами. Так, частковий розв'язок (1,2,4) може бути отриманий трьома шляхами:

а) (1), (1,2), (1,2,4);

б) (2), (1,2), (1,2,4);

в) (4), (2,4), (1,2,4).

Правила проходження по мережевої моделі, що розглянуті нижче, дозволяють вирішити дану неоднозначність і представити модель у вигляді дерева рішень  $B$  (не двійкового як у базовому алгоритмі розв'язку задачі булевого програмування, але такого, що містить меншу кількість вершин, які підлягають перегляду).

Спуск по дереву розв'язків. На кожному рівні і дерева розв'язків формується список  $M_s^1$ , одержуваний додаванням до списку  $M_{s-1}^1$ , досягнутому на попередньому рівні дерева розв'язків, номеру  $s$ , який визначається індексом  $g$  останнього ненульового елемента часткового розв'язку, отриманого на попередній вершині. При першій побудові подальшої вершини  $s = g + 1$ , при подальших побудовах подальших вершин:  $s = g + j$ , де  $j$  - кількість відвідувань попередньої вершини, зроблених раніше. Це означає, що значення  $x_s = 0$  замінюється значенням  $x_s = 1$ .

Підйом по дереву рішень. Якщо деяка вершина  $(x_1, x_2, \dots, x_s)$   $i$ -го рівня дерева розв'язків є кінцевою, то значення  $x_s = 1$  дорівнюють 0. Якщо  $s < N_t$ , то  $x_{s+1}$  дорівнюють 1 і продовжують спуск. В іншому випадку піднімаються на попередній рівень дерева, вважають  $x_{s-1} = 0$  і зондують наступну на цьому рівні (правого сусіда) вершину дерева розв'язків.

Аналіз побудованого дерева розв'язків дозволяє сформулювати

Правило 2. Другий і наступні перегляди подальших вершин дерева розв'язків здійснюються тільки на рівнях 1, ...,  $(N_t - 2)$ .

З процесу побудови дерева рішень  $B$  очевидно, що множина вершин рівня і дерева  $B$ , подальших за деякою вершиною попереднього рівня, впорядковано за незростанням функції мети  $F(x)$ .

Правило 3. Якщо досягнута вершина  $n$ -го рівня дерева рішень  $B$ , то вона генерує оптимальне значення функції мети задачі.

## 5. Результати досліджень

Проведемо чисельну реалізацію запропонованого методу розв'язання.

Нехай на розглянутій території є чотири ПНО ( $N = 4$ ). Нехай також виділені 4 рівня безпеки. Початкові рівні техногенної безпеки розглянутої множини ПНО задаються вектором  $u = \{1, 1, 2, 3\}$ . Пріоритети значущості підприємств, задані ОПР, мають вигляд:  $\lambda = \{0,3; 0,2; 0,2; 0,3\}$ .

Необхідно побудувати оптимальну 3-трехетапну  $\{t_1, t_2, t_3\}$  програму підвищення рівня техногенної безпеки регіону.

Покладемо, що прогнозовані витрати за періодами в умовних грошових одиницях розподіляються наступним чином:  $Z^{\text{доп}} = \{1400, 1900, 2200\}$ . Індекс інфляції  $r$  покладемо 10% у середньорічному обчисленні. Матриці витрат  $S_n(t_1)$ ,  $C_n(t_1)$ ,  $n=1, \dots, N$ ,  $n = 1, \dots, N$ , в перший період часу виконання програми мають вигляд (рис 1).

1-й етап розв'язку.  $N_1 = 4$ ,  $y_1 = \{1, 1, 2, 3\}$ .

У результаті параметричної ідентифікації математичної моделі (3) – (5) отримуємо

знайти  $x^* = \arg \max_{x \in D_1} \{0,3x_1 + 0,2x_2 + 0,2x_3 + 0,3x_4 + 1,8\}$

при обмеженнях

$$300x_1 + 250x_2 + 250x_3 + 100x_4 \leq 550,$$

$$x_n \in \{0,1\}, y_n^t \leq M_{\max}.$$

Розв'язок задачі першого етапу: значення функції мети  $F_1(x) = 2,4$ ; вектор  $x = (1,0,0,1)$ . Отже, вектор  $y_2 = \{2, 1, 2, 4\}$ . Це означає, що 4-й ПНО виведений на заданий рівень безпеки, і розмірність задачі зменшується на 1, тобто  $N_2 = 3$ .

2-й етап розв'язку. Задача має вигляд:

$$F_2(x) = \{0,3x_1 + 0,2x_2 + 0,2x_3 + 2,4\}.$$

Обмеження (7) на витрати має вигляд:

$$165x_1 + 275x_2 + 275x_3 + 1221 \leq 1900,$$

Розв'язок задачі 2-го етапу: вектор  $x_2 = (1,1,0)$ , вектор  $y^3 = \{3,2,2\}$ ,  $F_2(x) = 2,9$ .

3-й етап розв'язку. Задача є такою:

$$F(x) = \{0,3(3 + x_1) + 0,2(2 + x_2) + 0,2(2 + x_3) + 1,2\} = \{0,3x_1 + 0,2x_2 + 0,2x_3 + 0,3x_4 + 2,9\}.$$

ПНО		Рівні безпеки			
ПНО 1		1	2	3	4
Рівні безпеки	1	200	500	800	1200
	2		300	450	700
	3			320	400
	4				450
ПНО 2		1	2	3	4
Рівні безпеки	1	300	550	850	1250
	2		400	500	750
	3			500	350
	4				550
ПНО		Рівні безпеки			
ПНО 3					
	1	150	450	750	1200
	2		200	400	700
	3			300	300
	4				350
ПНО 4		1	2	3	4
	1	200	400	700	1000
	2		300	450	700
	3			400	300
	4				360

Рисунок 1. Визначення матриць витрат  $S_n(t_1)$ ,  $C_n(t_1)$ ,  $n=1, \dots, 4$

Обмеження (4) на витрати має вигляд:



$$97,8x_1 + 242x_2 + 242x_3 + 1427 \leq 2000 .$$

Розв'язок задачі третього етапу:

вектор  $x = (1,1,0)$ ; вектор  $y^{\text{opt}} = \{4, 3, 2\}$ ;  $F3(x) = 3,4$ .

## 6. Обговорення результатів дослідження

Рівень складності задач даного наукового дослідження зумовив необхідність використання арсеналу засобів моделювання – від застосування апарату зважених експертних оцінок  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$  значущості кожного з  $N$  ПНО території до адаптації базових моделей багатокритеріальної умовної оптимізації.

При побудові методу розв'язання задачі дослідження враховано таку особливість реального процесу планування фінансування, як горизонт планування, що дозволило представити вихідну задачу у вигляді ряду підзадач з функціями цілі і обмеженнями більш простого виду, відповідними етапу  $t$  виконання програми.

Підвищення рівня техногенної безпеки регіону (другий рівень ієрархії) виконувалося шляхом підвищення рівня техногенної безпеки окремих ПНО (перший рівень ієрархії) в рамках фінансування, що виділяється по етапах програми розвитку ТСТБ.

Аналіз розв'язків низки чисельних задач на чутливість показує, що при моделюванні розподілу коштів багатоетапної програми підвищення рівня безпеки додатково можна оцінити обсяг невикористаних коштів, а також відсутній обсяг коштів для підвищення рівня безпеки. Так, у прикладі попереднього розділу, якщо на другому етапі обсяг виділених витрат збільшити на менш, ніж 2%, до 1936 грошових одиниць, то прирощення значення функції мети зросте на 40%.

Даний підхід був програмно реалізований в середовищі візуального програмування Borland Delphi 7, мова програмування Object Pascal 6.0. під управлінням ОС Windows 7.

При цьому необхідно відмітити, що даний підхід до моделювання та розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації структури регіональних підрозділів ДСНС України є прийнятним в умовах реалізації надзвичайної ситуації природного характеру.

## 7. Висновки

1. Визначена узагальнена оцінка техногенної безпеки регіону, що враховує оцінку рівня техногенної безпеки окремих ПНО, які розміщуються на території регіону. Цей підхід відрізняється від відомих раніше більшою гнучкістю и спрямованістю на реальні умови функціонування ТСТБ.

2. Застосовано аналітичний опис оцінки техногенної безпеки регіону при побудові двокритеріальної оптимізаційної задачі підвищення рівня техногенної безпеки регіону на основі розробки багатоетапної програми розвитку територіальної системи техногенної безпеки з урахуванням її ієрархічної структури.

3. Проведено розробку методу розв'язання задачі підвищення рівня техногенної безпеки регіону шляхом складання багатоетапної програми розвитку ТСТБ з урахуванням її ієрархічної структури. Запропонований оптимізаційний метод заснований на модифікації адитивного алгоритму Балаша, що дозволило отримати розв'язок, близький до глобального оптимуму задачі.

## Література

1. Рыбак, А. И., Панафидин, Г. С. Методологические основы управления программами развития регионов Украины // Управление развитием сложных систем. 2014. № 19. С. 71-77.

2. Бушуева, Н. С. Модели и методы проактивного управления программами организационного развития. Київ: Наук. світ, 2007. 199 с.

3. Tanaka, H. Japanese project management practices on global projects. In

Global project management handbook, New York: McGraw-Hill. 2006. Chapter 26, 26-1 – 26-13.

4. Попов, В. М., Новожилова, М. В. Концепция адаптивного управления программами развития систем техногенной безопасности региона. // Управління розвитком складних систем. 2015. № 21. С. 156-162.

5. Bushuyev, S. D., Wagner R. F. IPMA Delta and IPMA Organisational Competence Baseline (OCB): New approaches in the field of project management maturity // International Journal of Managing Projects in Business. 2014. Vol. 7. № 2, 302 – 310.

6. Tanaka, T. Kaizen budgeting: Toyota's cost-control system under TQC // Journal of Cost Management. 1994. № 4, 56-62.

7. Бушуев, С. Д., Бушуева, Н. С., Бабаев И. А. Креативные технологии управления программами и проектами – Киев: Саммит книга, 2010. 768с.

8. Попов, В. М., Чуб, И. А., Новожилова, М. В. Концептуальное представление системы техногенной безопасности региона // Системы управління, навігації та зв'язку. 2012. 3(23). С. 206-209.

9. Попов, В. М., Чуб, И. А., Новожилова, М. В. Модель адаптивной системы техногенной безопасности региона. // Системы управління, навігації та зв'язку. 2013. 2(26). С. 120-123.

10. Попов, В. М., Чуб, И. А., Новожилова, М. В. Метод оптимизации многоэтапных программ повышения уровня техногенной безопасности региона // АСУ и приборы автоматики. 2013. 165. С. 70-76.

11. Попов, В. М. Оптимізація структури системи техногенної безпеки на етапі формування місії програми її розвитку // Науковий вісник НЛТУ України. 2015. 25.4. С. 363-367.

12. Попов, В. М., Новожилова, М. В. Имитационная модель производственной системы с потенциально опасными объектами // Радиоэлектроника и информатика. 2014. №4(67). С. 24-29.

13. Попов, В. М. Моделирование состояния устойчивости производственной системы // Системы обробки інформації. 2015. 3(128). С.147-151.

14. Popov, V. M., Novozhylova, M.V., Chub I.A. Modeling the optimal structure for territorial technogenic safety system // Econtechmod. 2015. No 3, 79-84.

15. Попов, В. М., Чуб, И. А., Новожилова М. В. Моделирование характеристик потока отказов основных производственных фондов объектов повышенной опасности // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2015. 21. С. 93-98.

16. Таха, Х. Введение в исследование операций. Москва: ИД «Вильямс», 2001. 912 с.

## References

1. Ryibak, A. I., Panafidin, G. S. (2014). Metodologicheskie osnovy upravleniya programmami razvitiya regionov Ukrainyi. Upravlinnya rozvitkom skladnih system, 19, 71-77.

2. Bushueva, N. S. (2007). Proaktivnoe upravlenie proektami organizatsionnogo razvitiya v usloviyah neopredelennosti. Upravlinnya proektami ta rozvitok virobnitstva, 2(22), 17-27.

3. Tanaka H. (2006). Japanese project management practices on global projects. In Global project management handbook, chapter 26, 26-1 – 26-13.
4. Popov, V. M., Novozhilova, M. V. (2015). Kontseptsiya adaptivnogo upravleniya programmami razvitiya sistem tehnogennoy bezopasnosti regiona. Upravlnnya rozvitkom skladnih system, 21, 156-162.
5. Bushuyev, S. D., Wagner, R. F. (2014). IPMA Delta and IPMA Organisational Competence Baseline (OCB): New approaches in the field of project management maturity. International Journal of Managing Projects in Business, 7, 302–310.
6. Tanaka T. (1994). Kaizen budgeting: Toyota's cost-control system under TQC. Journal of Cost Management, 4, 56-62.
7. Bushuev, S. D., Bushueva, N. S., Babaev, I. A. (2010). Kreativnyie tehnologii upravleniya programmami i proektami. Sammit kniga, 768.
8. Popov, V. M., Chub, I. A., Novozhilova, M. V. (2012). Kontseptualnoe predstavlenie sistemyi tehnogennoy bezopasnosti regiona. Sistemi upravlnnya, navlgatsIYi ta zv'yazku, 3(23), 206-209.
9. Popov, V. M., Chub, I. A., Novozhilova, M. V. (2013). Model adaptivnoy sistemyi tehnogennoy bezopasnosti regiona. Sistemi upravlnnya, navlgatsIYi ta zv'yazku, 2(26), 120-123.
10. Popov, V. M., Chub, I. A., Novozhilova, M. V. (2013). Metod optimizatsii mnogoetapnyih programm povyisheniya urovnya tehnogennoy bezopasnosti regiona ASU i priboryi avtomatiki, 165, 70-76.
11. Popov, V. M. (2015). Optyimizatsiia struktury systemy tekhnohennoi bezpeky na etapi formuvannia misii prohramy yii rozvytku. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 25.4, 363-367.
12. Popov, V. M., Novozhilova, M. V. (2014). Imitatsionnaya model proizvodstvennoy sistemyi s potentsialno opasnyimi ob'ektami. Radioelektronika i informatika, 4(67), 24-29.
13. Popov, V. M. (2015). Modelirovanie sostoyaniya ustoychivosti proizvodstvennoy sistemyi. Sistemi obrobki InformatsIYi, 3(128). 147-151.
14. Popov, V. M., Chub, I. A., Novozhilova, M. V. (2015). Modeling the optimal structure for territorial technogenic safety system. Econtechmod, 3, 79-84.
15. Popov, V. M., Chub, I. A., Novozhilova, M. V. (2015). Modelirovanie harakteristik potoka otkazov osnovnyih proizvodstvennyih fondov ob'ektov povyishennoy opasnosti. Problemi nadzvichaynih situatsIy, 21, 93-98.
16. Taha, H. (2001) Vvedenie v issledovanie operatsiy M. ID «Vilyams», 912.

Новожилова Марина Володимирівна  
Доктор фіз.-мат. наук, професор  
Завідувач кафедри  
Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій  
Харківський університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61003  
E-mail: m.novozhilova04@gmail.com  
Контактний тел.: 097-517-22-79  
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 33

Кількість статей у міжнародних базах даних – 18

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9977-7375>

Новожилова Марина Владимировна

Доктор физ.-мат. наук, профессор

Заведующая кафедрой

Кафедра прикладной математики и информационных технологий

Харьковский университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

ул. Маршала Бажанова, 17, м. Харьков, 61003

E-mail: [m.novozhilova04@gmail.com](mailto:m.novozhilova04@gmail.com)

Контактный тел.: 097-517-22-79

Количество статей в общегосударственных базах данных – 33

Количество статей в международных базах данных – 18

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9977-7375>

Novozhylova Maryna

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,

Head of the department of

Department of Applied Mathematics and Information Technologies

O.M. Beketov National University of Urban Economy

Marshala Bazhanova str., 17, Kharkiv, 61003

E-mail: [m.novozhilova04@gmail.com](mailto:m.novozhilova04@gmail.com)

Contact tel.: 097-517-22-79

The number of articles in the national database – 33

The number of articles in international databases – 18

<https://orcid.org/0000-0002-9977-7375>

Чуб Ольга Ігорівна

Кандидат економічних наук

Доцент кафедри

Кафедра теоретичної та прикладної системотехніки

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Площа Свободи 4, Харків, 61022

E-mail: [chubolya@gmail.com](mailto:chubolya@gmail.com)

Контактний тел.: 067-581-45-64

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 12

Кількість статей у міжнародних базах даних – 3

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-856X>

Чуб Ольга Игоревна

Кандидат экономических наук

Доцент кафедры

Кафедра теоретической и прикладной системотехники

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

Площадь Свободы 4, Харьков, 61022

E-mail: [chubolya@gmail.com](mailto:chubolya@gmail.com)

Контактный тел.: 067-581-45-64

Количество статей в общегосударственных базах данных – 12

Количество статей в международных базах данных – 3

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-856X>

Chub Olga

Doctor Philosophy

Assistant professor

Department of Theoretical and Applied Systems Engineering

V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022,

E-mail: [chubolya@gmail.com](mailto:chubolya@gmail.com)

Contact tel.: 067-581-45-64

The number of articles in the national database – 12

The number of articles in international databases – 3

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-856X>

Михайловська Юлія Валеріївна

Ад'юнкт ад'юнктури

Національний університет цивільного захисту України

вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023

E-mail: [mel@nuczu.edu.ua](mailto:mel@nuczu.edu.ua)

Контактний тел.: 050-981-10-17

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 2

Кількість статей у міжнародних базах даних – 2

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1090-5033>

Михайловская Юлия Валериевна

Адьюнкт адьюнктуры

Национальный университет гражданской защиты Украины

ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023

E-mail: [mel@nuczu.edu.ua](mailto:mel@nuczu.edu.ua)

Контактный тел.: 050-981-10-17

Количество статей в общегосударственных базах данных – 2

Количество статей в международных базах данных – 2

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1090-5033>

Mykhailovska Yuliia

adjunct

National University of Civil Defence of Ukraine

Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023

E-mail: [mel@nuczu.edu.ua](mailto:mel@nuczu.edu.ua)

Contact tel.: 050-981-10-17

The number of articles in the national database – 2

The number of articles in international databases – 2

<https://orcid.org/0000-0003-1090-5033>

Мележик Роман Сергійович

Ад'юнкт ад'юнктури

Національний університет цивільного захисту України

вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023

E-mail: [mel@nuczu.edu.ua](mailto:mel@nuczu.edu.ua)

Контактний тел.: 050-207-08-84

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 3

Кількість статей у міжнародних базах даних – 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7223-9825>

Мележик Роман Сергеевич

Адьюнкт адьюнктуры

Национальный университет гражданской защиты Украины

ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023

E-mail: [mel@nuczu.edu.ua](mailto:mel@nuczu.edu.ua)

Контактный тел.: 050-207-08-84

Количество статей в общегосударственных базах данных – 3

Количество статей в международных базах данных – 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7223-9825>

Melezhik Roman

adjunct

National University of Civil Defence of Ukraine

Chernyshevskaya str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023

E-mail: [mel@nuczu.edu.ua](mailto:mel@nuczu.edu.ua)

Contact tel.: 050-207-08-84

The number of articles in the national database – 3

The number of articles in international databases – 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7223-9825>

Гудак Роман Васильович

Начальник управління ДСНС України в Закарпатській області, Україна

вул. Болгарська, 2, м. Ужгород, Україна, 88000

E-mail: [zakarpattya@mns.gov.ua](mailto:zakarpattya@mns.gov.ua)

Контактний тел.: 097-315-98-81

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 2

Кількість статей у міжнародних базах даних – 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9960-0054>

Гудак Роман Васильевич

Начальник управления ГСЧС Украины в Закарпатской области, Украина

ул. Болгарская, 2, г. Ужгород, Украина, 88000

E-mail: [zakarpattya@mns.gov.ua](mailto:zakarpattya@mns.gov.ua)

Контактный тел.: 097-315-98-81

Количество статей в общегосударственных базах данных – 2

Количество статей в международных базах данных – 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9960-0054>

**Gudak Roman,**

Chief of the Department Head of the SESU of Ukraine in Transcarpathian region,  
Ukraine

Transcarpathian region, Uzhgorod, Bulgarian street, 2

E-mail: [zakarpattya@mns.gov.ua](mailto:zakarpattya@mns.gov.ua)

Contact tel.: 097-315-98-81

The number of articles in the national database – 2

The number of articles in international databases – 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9960-0054>



We propose an optimization mathematical model and a solution method for the problem of raising technogenic safety level of a territory by developing a multi-stage development program of the technogenic safety territorial system, taking into account its hierarchical structure and using the program management methodology of complex organizational, technical and social systems.

An evaluation of the level of technogenic safety of certain potentially dangerous objects (the first level of the hierarchy), which are located on the territory and make the main contribution to decreasing the level has been developed. In turn the territory technogenic safety assessment (second level of the hierarchy) is constructed.

In order to increase the level of territory technogenic safety we need to carry out raising the level of technogenic safety of certain potentially dangerous objects within the framework of financing taking place in the stages of the development program for the territorial system of technogenic safety. For this purpose, an optimization problem was formulated in the terms of integer (boolean) programming and the solution method has been developed.

To this end to resolve the optimization problem being formulated, the numerical method based on the application of the additive Balash algorithm is proposed in this paper, which allowed obtaining a solution close to the global optimum of the problem. In the framework of the proposed solution method, the rules for cutting off unpromising vertices of the problem solution tree are developed, and the procedures for descent and raising the tree solutions of the problem are analyzed.

So numerical realization of the proposed method that is intended to solve the optimization problem of the territory technogenic safety level raising is carried out. As a region, the territory where four potentially dangerous objects are located, each of which has four safety levels. As a result of the optimization problem solution development program for the system of territory technogenic safety which consisted of three stages was developed. Within each stage, an optimal allocation of resources (funds) to the development of the technogenic safety system of some potentially dangerous objects of the region was obtained.

**Key words: optimization mathematical model, territory technogenic safety level, development program**