

Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

Із використанням складових узагальненої характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню одержані вирази для варіації його частотних характеристик. Одержані залежності використовуються для отримання параметрів їх нормального розподілу, що використовується для одержання оцінок амплітудної та фазової надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню. Наведено кількісні показники амплітудної та фазової надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню.

Ключові слова: газогенератор, надійність, частотні характеристики.

Постановка проблеми

Виробництво, зберігання, доставка та використання водню є ключовими складовими водневої економіки [1]. При цьому однією із основних проблем при експлуатації водневих систем залишається забезпечення їх пожежовибухобезпеки [2].

Вирішення цієї проблеми повинно здійснюватися на всіх етапах життєвого циклу водневих систем і, зокрема, систем зберігання та подачі водню. Традиційна система зберігання водню в газоподібному стані та системи зберігання в рідкому стані мають проблеми із витратами та безпекою для бортових застосувань, внаслідок чого вони не задовольняють майбутні цілі щодо водневої економіки. Все більш привабливим варіантом для водневих застосувань стають твердотільні системи зберігання та подачі водню, внаслідок чого виникає необхідність в одержанні оцінок показників надійності, рівня пожежонебезпеки тощо вже на етапі проектування таких систем. Це стосується і елементів таких систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В [3] відмічається, що відсутність даних стосовно показників надійності систем зберігання водню обмежує можливості їх використання. Аналогічний висновок надається в роботі [4]. Показники надійності в роботі [5] використовуються для одержання оцінок рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню. При цьому використовується гіпотеза згідно із якою ймовірностям появи фрагментів горючого середовища відповідають ймовірності відмов елементів системи, що унеможливають появу

таких подій. Такий же підхід використано в роботі [6]. Визначення ймовірності безвідмовної роботи елементів систем зберігання та подачі водню потребує наявності статистичних даних, які практично відсутні, або відомостей стосовно інтенсивностей їх відмов. У довідковій літературі по інтенсивності відмов як правило надаються усереднені дані, а для інноваційних елементів такі дані відсутні. В [7] надійність газогенератора системи зберігання та подачі водню визначається із використанням даних стосовно його постійних часу, які є узагальненими параметрами газогенератора. Але такий підхід не враховує статичний параметр газогенератора – коефіцієнт передачі, варіації якого можуть суттєво впливати на показники надійності.

Все це дає підставу для проведення досліджень, спрямованих на більш детальне визначення показників надійності, зокрема, генератора системи зберігання та подачі водню як її основного елемента.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є обґрунтування процедури визначення надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню із використанням його динамічних характеристик.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати доцільність використання частотних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню для визначення його надійності;

- побудувати математичні моделі для варіації амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню як функцій варіацій його параметрів – коефіцієнта передачі та постійних часу;

- одержати кількісні показники для амплітудної та фазової надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню при його типових параметрах.

Виклад основного матеріалу

Динамічні властивості газогенератора системи зберігання та подачі водню визначаються його параметрами, вхідним та зовнішнім впливом. У свою чергу, параметри газогенератора (коефіцієнт передачі, постійні часу) є функціями параметрів його елементів. Протягом експлуатації газогенератора параметри його елементів (фізичні параметри) внаслідок старіння та під зовнішнім впливом змінюються по величині. Це, як правило, призводить до зміни якості перехідного процесу, виду частотних характеристик, області стійкості тощо. Наслідком цього може бути пониження точності та швидкодії, порушення стійкості газогенератора, тобто його відмова. Під відмовою газогенератора розуміється його стан, після появи якого характеристики газогенератора виходять за допустимі межі. Ймовірність невиходу характеристик газогенератора за допустимі межі буде відповідати ймовірності безвідмовної роботи газогенератора.

Визначення показників надійності газогенератора спрощується, якщо знаходити ймовірність відповідності газогенератора не всім його характеристикам, а лише його узагальненій характеристиці – функціоналу. Такий підхід виключає необхідність у використанні багатомірного розподілу характеристик газогенератора. В якості функціонала доцільним є використання передаточної функції газогенератора $W(p)$ або його амплітудно-фазової частотної характеристики $W(j\omega)$. Внаслідок того, що має місце.

$$W(j\omega) = W(p)|_{p=j\omega} = A(\omega) \exp[j\varphi(\omega)] \quad (1)$$

де ω – кругова частота; j – уявна одиниця; $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ – амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики газогенератора відповідно, в якості функціоналів можуть бути використані частотні характеристики газогенератора.

Передаточна функція газогенератора має вигляд [8]

$$W(p) = K(1 - \tau_1 p)[(\tau_2 p + 1)(\tau_3 p + 1)]^{-1}, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт передачі; τ_i – постійні часу (і = 1,3).

Цій передаточній функції відповідають частотні характеристики $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ [9]

$$A(\omega) = K \left[\left[1 + (\omega\tau_1)^2 \right] \left[1 + (\omega\tau_2)^2 \right] \left[1 + (\omega\tau_3)^2 \right] \right]^{-0.5}; \quad (3)$$

$$\varphi(\omega) = - \sum_{i=1}^3 \arctg \omega\tau_i. \quad (4)$$

Якщо в процесі експлуатації параметри газогенератора змінюються на величини ΔK , $\Delta\tau_i$ (і = 1,3), то це призведе до зміни його частотних характеристик на величини ΔA та $\Delta\varphi$, які визначаються виразами

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial K} \Delta K + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial A}{\partial \tau_i} \Delta \tau_i; \quad (5)$$

$$\Delta \varphi = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_i} \Delta \tau_i. \quad (6)$$

В термінах для відносних величин вирази (5) та (6) трансформуються до вигляду

$$\delta A = A^{-1}(\omega) \left[\frac{\partial A}{\partial K} K \delta K + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial A}{\partial \tau_i} \tau_i \delta \tau_i \right]; \quad (7)$$

$$\delta \varphi = \varphi^{-1}(\omega) \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \varphi}{\partial \tau_i} \tau_i \delta \tau_i, \quad (8)$$

де

$$\delta A = A^{-1}(\omega) \Delta A; \quad \delta \varphi = \varphi^{-1}(\omega) \Delta \varphi; \quad (9)$$

$$\delta K = K^{-1} \Delta K; \quad \delta \tau_i = \tau_i^{-1} \Delta \tau_i.$$

Після об'єднання виразів (3), (4), (7)÷(9) буде мати місце

$$\delta A = \delta K + a(\omega\tau_1) \delta \tau_1 - \sum_{i=2}^3 a(\omega\tau_i) \delta \tau_i, \quad (10)$$

$$\delta \varphi = \left[\arctg \left[\omega \left(\sum_{i=1}^3 \tau_i - \omega^2 \prod_{i=1}^3 \tau_i \right) \left[1 - \omega^2 \times \right. \right. \right. \left. \left. \left. \times (\tau_1\tau_2 + \tau_1\tau_3 + \tau_2\tau_3) \right]^{-1} \right] \right]^{-1} \times \left[\sum_{i=1}^3 b(\omega\tau_i) \delta \tau_i, \right] \quad (11)$$

де

$$a(\omega\tau_i) = (\omega\tau_i)^2 \left[1 + (\omega\tau_i)^2 \right]^{-1}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (12)$$

$$b(\omega \tau_i) = \omega \tau_i [1 + (\omega \tau_i)^2]^{-1}, i = \overline{1,3}. \quad (13)$$

Відносні відхилення δA та $\delta \varphi$ залежать від частоти ω . У зв'язку із цим доцільно розглядати величини цих відхилень у діапазоні частот, який відповідає полосі пропускання газогенератора. Полоса пропускання ω_0 газогенератора визначається коренем алгебраїчного рівняння

$$A(\omega)A^{-1}(0) - \frac{1}{\sqrt{2}} = 0, \quad (14)$$

що еквівалентно знаходженню кореня бікватратного алгебраїчного рівняння

$$\tau_2^2 \tau_3^2 \omega^4 + (\tau_2^2 + \tau_3^2 - 2\tau_1^2) \omega^2 - 1 = 0, \quad (15)$$

При $\tau_1 = 8,0\text{мс}$; $\tau_2 = 7,0\text{мс}$; $\tau_3 = 15,0\text{мс}$ [10] має місце $\omega_0 = 70,6\text{с}^{-1}$. Якщо $\Delta\tau_i = \Delta\tau = 0,6\text{мс}$, то $\delta\tau_1 = 7,5\%$; $\delta\tau_2 = 8,6\%$; $\delta\tau_3 = 4,0\%$. Для цих даних на рис. 1 наведені графічні залежності $\delta A(\omega)$, параметром яких є величина δK .

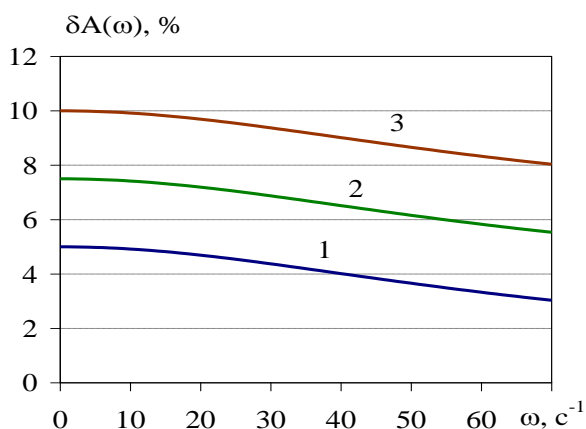


Рис.1. Залежності $\delta A(\omega)$: 1 – $\delta K = 5,0\%$; 2 – $\delta K = 7,5\%$; 3 – $\delta K = 10,0\%$

В полосі пропускання газогенератора величина відносного відхилення δA змінюється не більше, ніж на 2,0 %, а її найбільше значення має місце при $\omega \rightarrow 0$.

Згідно із теоремою Ляпунова величина δA має нормальний розподіл, параметрами якого є математичне очікування $m_A = 0$ та середньоквадратичне відхилення $\sigma_A = \frac{\delta A_{\max}}{3}$.

Якщо $\delta A_{\text{д}}$ – допустиме значення величини відносного відхилення δA , то ймовірність того, що

величина δA не буде виходити за межі допуску, визначається виразом

$$P(\delta A < \delta A_{\text{д}}) = \Phi\left(\frac{\delta A_{\text{д}}}{\sigma_A}\right), \quad (16)$$

де Φ – функція Лапласа.

У таблиці 1 наведені приклади стосовно оцінок амплітудної надійності газогенератора для $\delta A_{\text{д}} = 5,0\%$.

Таблиця 1

Оцінка амплітудної надійності газогенератора

$\delta A_{\max}, \%$	$\sigma_A, \%$	$\delta A_{\text{д}} \sigma_A^{-1}$	$P(\delta A < \delta A_{\text{д}})$
5,0	1,67	2,99	0,9973
7,5	2,50	2,00	0,9545
10,0	3,34	1,50	0,8664

На рис.2 наведена графічна залежність $\text{abs}(\delta\varphi(\omega))$ для тих же параметрів, що і для залежностей $\delta A(\omega)$

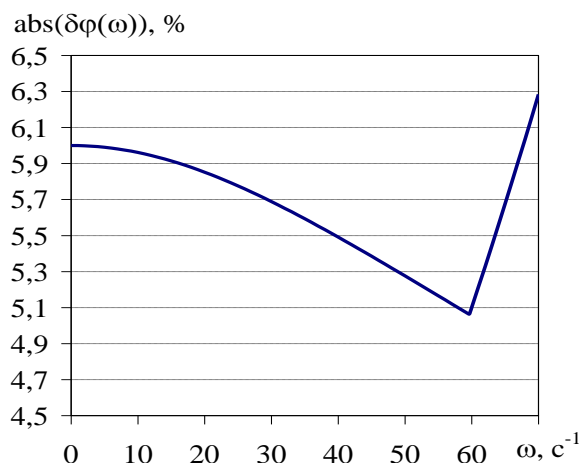


Рис.2. Залежність $\text{abs}(\delta\varphi(\omega))$

Для залежності $\delta\varphi(\omega)$ найбільше значення по абсолютній величині складає 6,4 % на частоті $\omega_0 = 70,6\text{с}^{-1}$.

Ймовірність того, що величина $\delta\varphi$ не буде виходити за межі допуску, визначається виразом

$$P(\delta\varphi < \delta\varphi_{\text{д}}) = \Phi\left(\frac{\delta\varphi_{\text{д}}}{\sigma_{\varphi}}\right), \quad (17)$$

де $\delta\varphi_{\text{д}}$ – допустиме значення; σ_{φ} – середньоквадратичне відхилення. При $\delta\varphi_{\text{д}} = 5,0\%$;

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\delta\varphi_{\max}}{3} = 2,13\% \quad \text{величина ймовірності} \quad (17)$$

дорівнює 0,9812.

Із наведених прикладів витікає, що на момент запуску газогенератора системи зберігання та подачі водню із ймовірністю 0,9973 та 0,9812 його відповідно амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики не будуть відрізнятися від номінальних значень більше, ніж на $\pm 5,0\%$.

Висновки

1. Показано, що для визначення надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню доцільно в якості узагальненої характеристики, яка відображає його властивості, використовувати функціонал у вигляді його амплітудно-фазової характеристики або складових цієї частотної характеристики – амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристики газогенератора.

2. Із використанням частотних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню побудовані математичні моделі для варіацій амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик як функції варіацій його коефіцієнта передачі, постійних часу, а також в залежності від частоти. Для цих математичних моделей введено обмеження по частоті, яке відповідає діапазону частот, що належить полосі пропускання газогенератора.

3. Для типових параметрів газогенератора системи зберігання та подачі водню одержані оцінки його амплітудної та фазової надійності і показано, що відповідно із ймовірністю 0,9973 та 0,9812 його амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики не будуть відрізнятися від номінальних значень більше, ніж на $\pm 5,0\%$ при включенні газогенератора.

Література

1. I.A.Hassan, Haithan S. Ramadan, Mohamed A. Saleb, Daniel Hissel, *Hydrogen sbrade technologies for stationary and mobile applications: Review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 149, 2021, 111311, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>
2. Li Y., Lin Zh., Wei J., Lan Y., Yang S., Jin T. *Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident// Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. P.1-8. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.prep.2020.08.037>
3. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth, *Data requiremnts for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems, International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, Jssue 6, 2022, P.4222-4235, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>
4. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth, *Opportunities and data requiremnts for data-driven prognostics and health management in liquid hydrogen storage systems, International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, Jssue 43, 2022, P.18748-18762, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.048>

5. Абрамов Ю.А. *Определение вероятности появления горючей среды в объекте/ Ю.А. Абрамов, А.В. Бастеев, В.И. Кривцова // Проблемы пожарной безопасности.– Х.: ХИПБ, 1999.– С.96-99.*
6. Абрамов Ю.А. *Алгоритм обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности объекта/ Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, В.И. Кривцова//Проблемы пожарной безопасности.– Х.: Фолио, 2000.– Вып. 7.– С. 3–6.*
7. Абрамов Ю.О. *Алгоритм визначення показника надійності газогенератора системи зберігання та подачі водню/ Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // Комунальне господарство міст –Х, Том 4, вип.164, 2021, С. 153-157, DOI [10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157)*
8. Abramov, Yu., Borisenko, V., Krivtsova, V. *Design of control algorithm over technical condition of hydrogen generators based on hydro-reactive compositions. Eastern-European Journal of Enterprises Technologies, Industry Control Systems*, 5 (8–89), 2017, 16–21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200>
9. Abramov, Yu., Basmanov, A., Krivtsova, V., Mikhayluk, A. *The synthesis of control algorithm over a technical condition of the hydrogen generators based on hydro-reactive compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems*, 3 (2–93), 2018, 54–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131020>
10. Abramov Yu., Basmanov A., Krivtsova V., Mikhailyuk A., Mikhailyuk O. *Developing an algorithm for monitoring gas generators of hydrogen storage and supply systems. EUREKA: Physics and Engineering*. 2, 2022, P. 45-54, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002262>

References

1. I.A. Hassan, Haithan S. Ramadan, Mohamed A. Saleb, Daniel Hissel (2021) Hydrogen sbrade technologies for stationary and mobile applications: *Review Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 149, 111311, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>
2. Li Y., Lin Zh., Wei J., Lan Y., Yang S., Jin T. (2021) Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 146. P.1-8. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.prep.2020.08.037>
3. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth (2022) Data requiremnts for improving the Quantitative Risk Assessment of liquid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, Jssue 6, P.4222-4235, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.266>
4. Camila Correa-Jullian, Katrina Groth (2022) Opportunities and data requiremnts for data-driven prognostics and health management in liquid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 47, Jssue 43, P.18748-18762, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.048>
5. Abramov Yu., Basteev A., Krivtsova, V. (1999) Determination of the probability of the appearance of a combustible medium in an object. *Problems of fire safety*. P.96-99.
6. Abramov Yu., Rosokha V., Krivtsova, V. (2000) Algorithm for ensuring the required level of fire safety of the object. *Problems of fire safety*. V. 7. P. 3–6.
7. Abramov Yu.O., Krivtsova, V., Mikhailyuk A. (2021) Algorithm for determining the indicator of reliability of the gas generator of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*, 4, 164, 153-157, DOI [10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157)
8. Abramov, Yu., Borisenko, V., Krivtsova, V. (2017) Design of control algorithm over technical condition of hydrogen generators based on hydro-reactive compositions. *Eastern-European Journal of Enterprises Technologies, Industry*

Control Systems, 5 (8–89), 16–21. DOI:

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200>

9. Abramov, Yu., Basmanov, A., Krivtsova, V., Mikhayluk, A. (2018) The synthesis of control algorithm over a technical condition of the hydrogen generators based on hydro-reactive compositions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems*, 3 (2–93), 54–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131020>

10. Abramov Yu., Basmanov A., Krivtsova V., Mikhailiuk A., Mikhailiuk O. (2022) Developing an algorithm for monitoring gas generators of hydrogen storage and supply systems. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2. P. 45-54, DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002262>

Рецензент: д.т.н., професор, головний науковий співробітник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру О.Є. Басманов, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

Автор: АБРАМОВ Юрій Олексійович

доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Національний університет цивільного захисту України

E-mail - abramov121146@gmail.com

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

Автор: КРИВЦОВА Валентина Іванівна

доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізико-математичних дисциплін факультету техногенно-екологічної безпеки Національний університет цивільного захисту України

E-mail - krivtsovav53@gmail.com

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8254-5594>

Автор: МИХАЙЛЮК Андрій Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник докторантури, ад'юнктури

Національний університет цивільного захисту України

E-mail - mihayluk.nuczu@gmail.com

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

DETERMINATION OF THE RELIABILITY OF THE GAS GENERATOR OF THE STORAGE SYSTEM AND HYDROGEN SUPPLY

Y. Abramov, V. Krivtsova, A. Mikhailiuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

It is noted that as a generalized characteristic of the functional gas generator, which is sensitive to variations in its parameters, it is advisable to use the transfer function, or its analogue - the amplitude-phase frequency characteristic of the gas generator. The amplitude-phase frequency characteristic of the gas generator includes two components - amplitude-frequency and phase-frequency characteristics. During the operation of the gas generator, there will be variations in its parameters - transmission coefficient and time constants, due to aging processes and the influence of external factors. Variations in the parameters of the gas generator lead to variations in its amplitude-frequency and phase-frequency characteristics. Mathematical models for variations in the frequency characteristics of the gas generator are built and it is shown that their frequency range should be limited by the bandwidth of the gas generator. The upper limit of the bandwidth of the gas generator is determined by the root of the biquadratic algebraic equation. For the typical parameters of the gas generator using a hydroreactive sample based on sodium aluminate, graphical dependences of variations of its amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are constructed depending on variations of the transmission coefficient, time constants, and frequency. These dependencies are used to determine the parameters of the normal distribution law of variations in the frequency characteristics of the gas generator. In accordance with Lyapunov's rule, a normative law for the distribution of variations in the frequency characteristics of the gas generator is adopted. Due to the symmetry of the distribution of variations in the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the gas generator, their mathematical expectations are equal to zero. Obtaining estimates of the amplitude and phase reliability of the gas generator is carried out using the Laplace function. The argument of this function is the permissible values of the frequency characteristics of the gas generator and their root mean square deviations. It is shown that with probabilities of 0,9973 and 0,9812, the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the gas generator will not differ more than $\pm 5,0\%$ when it is turned on.

Keywords: gas generator, reliability, frequency characteristics.