

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ПАРАМЕТРА ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

Розроблено метод визначення динамічного параметра основного елемента системи зберігання та подачі водню – газогенератора. Розроблений метод орієнтований на використання в алгоритмі контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню, який у свою чергу, є складовою системи пожежної профілактики. В основі метода лежить використання математичного опису амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню, в якому в явному вигляді має місце функціональна залежність від динамічного параметра такого газогенератора. В якості первинної інформації стосовно часових властивостей газогенератора системи зберігання та подачі водню використовується інформація стосовно його часової характеристики – перехідної функції. Експериментальним шляхом здійснюється формування масиву даних, який використовується для побудови математичного опису частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню, що реалізується чисельним шляхом. Обґрунтування математичного опису амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню здійснюється із використанням методу найменших квадратів. При цьому використовується математичний опис частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню в стандартній формі. Метод визначення динамічного параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню включає послідовність взаємопов'язаних процедур і орієнтований на графічний метод розв'язання трансцендентного рівняння, яке будується на основі методу найменших квадратів. Для підтвердження достовірності одержаних результатів вирішується тест-задача.

**Ключові слова:** газогенератор, система зберігання та подачі водню, динамічний параметр, частотні характеристики.

### Постановка проблеми

Водень є одним із перспективних палив на шляху зміни сучасної ситуації із світовою енергетикою [1]. Ефективність використання водню визначається багатьма складовими, однією із яких є ефективність систем зберігання та подачі водню, яка залежить від їх характеристик [2]. До числа таких характеристик належить рівень пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню, який забезпечується організаційними та технічними методами. Одним із таких методів є проведення контролю технічного стану систем зберігання та подачі водню як складової їх пожежної профілактики. Реалізація алгоритмів контролю технічного стану систем зберігання та подачі водню і, зокрема, їх основного елемента – газогенератора обумовлює необхідність в одержанні інформації стосовно його узагальнених параметрів. У зв'язку із цим однією із проблем при експлуатації систем зберігання та подачі водню є удосконалення методів та засобів пожежної профілактики.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Контроль технічного стану основного елемента систем зберігання та подачі водню – газогенератора

є елементом системи пожежної профілактики. У переважній більшості випадків в якості узагальнених параметрів при контролі технічного стану таких газогенераторів використовується температура [3] або концентрація водню [4]. В роботі [5] показано, що в якості такого параметра може використовуватись тиск в порожнині газогенератора. Можливе також безпосереднє використання динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню [6] при реалізації алгоритмів контролю його технічного стану. Одним із узагальнених параметрів, який повністю характеризує динамічні властивості газогенератора системи зберігання та подачі водню, є його динамічний параметр – постійна часу [1]. Для його визначення використовуються як часові [7], так і частотні [8 ÷ 11] динамічні характеристики газогенератора. Часові динамічні характеристики газогенератора можуть використовуватись для одержання його частотних характеристик [12]. Слід зазначити, що як правило при використанні динамічних характеристик газогенератора для визначення його динамічного параметра їх математичний опис задається апріорі. У зв'язку із цим доцільним є розробка методу визначення динамічного параметра

газогенератора системи зберігання та подачі водню, який оснований на використанні обґрунтованого математичного опису його частотних характеристик.

### Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка методу визначення динамічного параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- із використанням методу найменших квадратів обґрунтувати математичний опис амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню, який включає явну функціональну залежність від його динамічного параметра;

- розробити алгоритм методу визначення динамічного параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню із використанням його ідентифікованої амплітудно-частотної характеристики;

- вирішити тест-задачу для підтвердження одержаних результатів.

### Виклад основного матеріалу

Для визначення динамічного параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню будемо використовувати його амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), яка апроксимується виразом

$$A_0(\omega) = K [1 + (\omega\tau)^2]^{-0,5}, \quad (1)$$

де  $K$ ,  $\tau$  – коефіцієнт передачі та динамічний параметр газогенератора;  $\omega$  – кругова частота.

Будемо вважати, що в нашому розпорядженні є вираз для АЧХ  $A_1(\omega)$ , який одержаний одним із методів його ідентифікації.

Згідно із методом найменших квадратів можна записати

$$\int_0^{\omega_0} \frac{d}{d\tau} \left[ A_1(\omega) - K [1 + (\omega\tau)^2]^{-0,5} \right]^2 d\omega = 0, \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – гранична частота робочого діапазону частот газогенератора.

Вираз (2) може бути переписаний наступним чином

$$\int_0^{\omega_0} A_1(\omega) \omega^2 [1 + (\omega\tau)^2]^{-1,5} d\omega =$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{\omega_0} K \omega^2 [1 + (\omega\tau)^2]^{-2} d\omega = \\ &= 0,5 K \tau^{-3} \left[ \arctg \omega_0 \tau - \right. \\ &\left. - \omega_0 \tau [1 + (\omega_0 \tau)^2]^{-2} \right] = B(\tau), \quad (3) \end{aligned}$$

де

$$B(\tau) = \int_0^{\omega_0} A_1(\omega) \omega^2 [1 + (\omega\tau)^2]^{-1,5} d\omega. \quad (4)$$

В [12] показано, що отримання виразу  $A_1(\omega)$  може бути здійснено експериментальним шляхом із використанням часової характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню. В якості такої часової характеристики використовується перехідна функція. В цьому випадку (АЧХ)  $A_1(\omega)$  газогенератора має вигляд

$$A_1(\omega) = F_0^{-1} \left[ \left[ \sum_{k=0}^n \Delta_k \cos[\omega(k+0,5)\Delta t] \right]^2 + \left[ \sum_{k=0}^n \Delta_k \sin[\omega(k+0,5)\Delta t] \right]^2 \right]^{0,5}, \quad (5)$$

де  $F_0$  – величина стрибкоподібної зміни площі вихідного отвору газогенератора;  $\Delta t = 0,5 f_0^{-1}$  – інтервал часу, на якому здійснюються вимірювання приросту тиску  $\Delta_k$  в порожнині газогенератора;  $f_0$  – максимальне значення частоти спектру функції  $P(t)$ , яка описує тиск у порожнині газогенератора.

Слід зазначити, що функція  $A_1(\omega)$ , яка описується виразом (5), в явному вигляді не залежить від динамічного параметра  $\tau$  газогенератора системи зберігання та подачі водню.

Вирази (3) ÷ (5) є основою для реалізації методу визначення динамічного параметра – постійної часу  $\tau$  газогенератора системи зберігання та подачі водню. Цей метод зводиться до виконання послідовності наступних процедур:

- змінюють площу  $F(t)$  вихідного отвору газогенератора за законом

$$F(t) = F_0 \bullet l(t), \quad (6)$$

де  $l(t)$  – функція Хевісайда;

- в кожний із моментів часу, які відстають один від одного на величину  $\Delta t$ , здійснюють вимірювання приросту  $\Delta_k$  тиску  $P(t)$  в порожнині газогенератора

$$\Delta_k = P_{k+1} - P_k, k = \overline{0, n}; \quad (7)$$

- одержаний масив даних використовують для побудови АЧХ  $A_1(\omega)$  згідно виразу (5);

- для заданої величини частоти  $\omega_0$  обчислюють при  $\tau = \text{var}$  величини  $B(\tau)$  згідно виразу (6). Варіювання величин  $\tau$  здійснюють відносно її номінального значення;

- одержаний масив даних використовують для апроксимації функції  $B(\tau)$  поліноміальною моделлю

$$B(\tau) = \sum_{i=0}^m a_i \tau^i, \quad (8)$$

де  $a_i$  – коефіцієнти;

- будують графіки функцій  $B(\tau)$  та  $\varphi(\tau)$ , де

$$\varphi(\tau) = 0,5K\tau^{-3} \left[ \arctg \omega_0 \tau - \omega_0 \tau \left[ 1 + (\omega_0 \tau)^2 \right]^{-2} \right], \quad (9)$$

$$K = F_0^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta_k; \quad (10)$$

- величину динамічного параметра  $\tau$  газогенератора системи зберігання та подачі водню визначають координатою точки перетину функцій  $B(\tau)$  та  $\varphi(\tau)$ .

Розглянемо приклад.

В якості перехідної функції для визначення АЧХ  $A_1(\omega)$  будемо використовувати перехідну функцію інерційної ланки першого порядку із постійною часу  $\tau_0 = 10^{-2}$  с. При  $\omega_0 = 10$  с<sup>-1</sup> результати визначення функції  $B(\tau)K^{-1}$  для  $\tau = (0,005 \div 0,02)$  с наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення функцій  $B(\tau)K^{-1}$

$\tau, \text{с}$	$B(\tau)K^{-1}, \text{с}^{-3}$
0,005	331,59
0,01	329,38
0,015	325,75
0,02	320,79

Із табл. 1 витікає, що функція  $B(\tau)K^{-1}$  може бути апроксимована виразом

$$B(\tau)K^{-1} = 1,2 \cdot 10^5 \tau^3 - 3,2 \cdot 10^3 \tau^2 + 17\tau + 332,29. \quad (11)$$

Для функцій  $B(\tau)K^{-1}$  та  $\varphi(\tau)$  координатою точок перетину їх графічних залежностей є  $\tau = 0,00998 \text{с} \approx 0,01 \text{с}$ , що співпадає із величиною  $\tau_0 = 0,01 \text{с}$ .

## Висновки

Із використанням методу найменших квадратів обґрунтовано використання математичного опису амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню, який представляє собою стандартну форму частотної характеристики інерційної ланки першого порядку.

В якості первинної інформації стосовно амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню використовується масив експериментальних даних стосовно його перехідної функції, за допомогою якого чисельним шляхом будується математичний вираз амплітудно-частотної характеристики.

Розроблений алгоритм методу визначення динамічного параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню передбачає розв'язання трансцендентного урівняння графічним шляхом. Із використанням рішення тест-задачі підтверджена достовірність одержаних результатів.

## Література

1. Кривцова В.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 4. Ветроводородная энергетика / В.И. Кривцова, А.М. Олейников, А.П. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2007. – 606 с.
2. Абрамов Ю.О. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Абрамов Ю.О., Кривцова В.И., Соловей В.В. – Харьков, 2002. – 277 с.
3. Li Zh. Mitigation measures for intended hydrogen release from thermally activated pressure relief device of onboard storage / Li Zh., Sun K. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45(15). – Pp. 9260–9267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.084>
4. Abramov Yu. Design of control algorithm over technical condition of hydrogen generators based on hydro-reactive compositions / Yu. Abramov, V. Borisenko, V. Krivtsova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems. – 2017. – Vol. 5(8–89). – Pp. 16–21. DOI: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200>
5. Абрамов Ю.О. Алгоритм контролю технічного стану газогенераторів системи зберігання та подачі водню в контексті їх пожежної профілактики / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // Комунальне господарство міст. – 2021. – Вип. 1(161). – С. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-284-289>

6. Спосіб контролю оператора мобільної пожежної установки: Пат. 148694 Україна: МПК А62С 37/00, А62С 37/50, G09 В 9/02, А61 В 5/16/ Абрамов Ю.О., Собина В.О., Загора О.В., Феценко А.Б., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №202100702; заяв. 17.02.2021; опубл. 8.09. 2021, Бюл. № 36.

7. Абрамов Ю.О. Газогенератори систем зберігання та подачі водню на основі гідрореакуючих складів: моделі, характеристики, методи контролю / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк. – Харків, 2020. – 87 с.

8. Абрамов Ю.О. Фазові методи контролю газогенераторів систем зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // Комунальне господарство міст. – 2021. – Вип. 6 (166). – С. 146–150. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-146-150>

9. 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. – 2021. – Вип. 4(164). – С. 153–157. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157>

10. Абрамов Ю.О. Обґрунтування методу визначення постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // Комунальне господарство міст. – 2021. – Вип. 3(163). – С. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-216-220>

11. Абрамов Ю.О. Амплітудні методи контролю газогенераторів системи зберігання та подачі водню / Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова, А.О. Михайлюк // Комунальне господарство міст. – 2022. – Вип. 1(168). – С. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-1-168-81-85>

12. Спосіб визначення динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню : Пат. 109686 Україна: МПК G018В3/06 /Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201603531; заяв. 4.04.16; опубл. 25.08.16, Бюл. № 16.

## References

1. Krivtsova, V.I., Oleinikov, A.M., Yakovlev, A.P. (2007). *Inexhaustible energy. Book 4. Wind and hydrogen energy*. Kharkiv, Nat. aerospace un-t "KhAI". [in Russian]

2. Abramov, Yu.O., Krivtsova, V.I., Solovey, V.V. (2002). *Hydrogen storage and supply systems based on solids for on-board power plants*. Kharkiv. [in Russian]

3. Li, Zh., & Sun, K. (2020). Mitigation measures for intended hydrogen release from thermally activated pressure relief device of onboard storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 9260–9267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.084>

4. 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 Enterprise Technologies, Industry Control Systems*, 5(8–89), 16–21. DOI: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200>

5. Abramov, Y., Kryvtsova, V., Mikhailyuk, A. (2021). Technical condition control algorithm gas generators of storage systems and hydrogen supply in the context of their fire prevention. *Municipal economy of cities*, 1 (161), 284–289. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-284-289> [in Ukrainian]

6. Method for controlling the operator of a mobile fire installation: Pat. 148694 Ukraine: MПК А62С 37/00, А62С 37/50, G09 В 9/02, А61 В 5/16/ Abramov Yu.O., Sobina V.O., Zakora O.V., Feshchenko A.B., dec. and patent holder of the National University of Civil Defense of Ukraine. – No. 202100702; dec. 02/17/2021; publ. 8.09. 2021, Bull. No. 36. [in Ukrainian]

7. Abramov, Yu.O., Krivtsova, V.I., Mikhailyuk, A.O. (2020). *Gas generators of systems for saving and supplying water on the basis of hydro-reactive warehouses: models, characteristics, methods of control*. Kharkiv. [in Ukrainian]

8. Abramov, Y., Kryvtsova, V., Mikhailyuk, A. (2021). Phase methods of gas generators control hydrogen storage and supply systems. *Municipal economy of cities*, 6 (166), 146–150. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-146-150> [in Ukrainian]

9. Abramov, Y., Kryvtsova, V., Mikhailyuk, A. (2021). Algorithm for determination of reliability indicator of gas generator of hydrogen storage and supply system. *Municipal economy of cities*, 4 (164), 153–157. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-153-157> [in Ukrainian]

10. Abramov, Y., Kryvtsova, V., Mikhailyuk, A. (2021). Justification of the method of determination of the constant time of the gas generator of the system of storage and supply of hydrogen. *Municipal economy of cities*, 3 (163), 216–220. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-216-220> [in Ukrainian]

11. Abramov, Y., Kryvtsova, V., Mikhailyuk, A. (2022). Amplitude methods for control of gas generators water saving systems. *Municipal economy of cities*, 1(168), 81–85. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-1-168-81-85> [in Ukrainian]

12. Method for determining the dynamic characteristics of the gas generator of the system for saving and supplying water : Pat. 109686 Ukraine: IPC G018B3/06/ Abramov Yu.O., Borisenko V.G., Krivtsova V.I., App. and patent holder of the National University of Civil Defense of Ukraine. No. 201603531; dec. 4.04.16; publ. 08/25/16, Bull. No. 16. [in Ukrainian]

**Рецензент:** д.т.н., професор, г.н.с. наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру О.С. 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](mailto:abramov121146@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

**Автор:** КРИВЦОВА Валентина Іванівна  
доктор технічних наук, професор, професор каф. фізико-математичних дисциплін  
Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – [krivtsovav53@gmail.com](mailto:krivtsovav53@gmail.com)  
ID ORCID: <https://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](mailto:mihayluk.nuczu@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

## DYNAMIC PARAMETER VALUE OF THE GAS GENERATOR WATER SAVING SYSTEMS

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

*The method for determining the dynamic parameter of the main element of the water saving system and the supply of water, the gas generator, has been developed. Expanding the method of orienting to the selection in the algorithm for controlling the technical station of the gas generator, the system for saving and supplying water, which is in its own place, is the storage system for fire prevention. The method is based on a mathematical description of the amplitude-frequency characteristics of the gas generator of the system for saving and supplying water, in which, in an obvious way, there is a functional fallacy of the dynamic parameter of such a gas generator. In the capacity of the primary information of one hundred hourly power of the gas generator of the system for saving and supplying water, there is information of one hundred and fifty hourly characteristics - a transitional function. An experimental way is used to form an array of data, which is designed to encourage a mathematical description of the frequency response of the gas generator of the system for saving and supplying water, which is realized by a numerical way. The grounding of the mathematical description of the amplitude-frequency characteristics of the gas generator of the system for saving and supplying water is based on the least squares method. In this case, a mathematical description of the frequency response of the gas generator of the system for saving water supply in the standard form is obtained. The method of determining the dynamic parameter of the gas generator of the water supply saving system includes the sequence of mutual procedures and orientations to the graphical method of developing transcendental alignment, which will be based on the least squares method. To confirm the reliability of the obtained results, a test task is verified.*

**Keywords:** gas generator, system for saving and supplying water, dynamic parameter, frequency characteristics.