

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСОВОГО ПАРАМЕТРА ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

В основі методу лежить апроксимація часткової похідної від виразу для фазово-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню по частоті. Показано, що визначення фазово-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню доцільно проводити із використанням його перехідної функції. Побудована послідовність процедур, виконання яких забезпечує визначення часового параметра газогенератора. Показано, що відносна похибка визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню не перевищує 1,0 %.

Ключові слова: система зберігання та подачі водню, газогенератор, часовий параметр, фазово-частотна характеристика.

Постановка проблеми

Ефективність використання водню визначається багатьма складовими, однією з яких є ступінь досконалості характеристик систем одержання, зберігання та подачі водню [1,2]. До числа таких характеристик належить, зокрема, рівень їх пожежонебезпеки, який забезпечується організаційно та технічно. Контроль та діагностика систем зберігання та подачі водню є одним із ефективних методів їх пожежної профілактики. Реалізація такого методу обумовлює необхідність у визначенні узагальнених параметрів систем зберігання та подачі водню. Одним із таких параметрів є часовий параметр – постійна часу газогенератора системи зберігання та подачі водню, яка повністю характеризує його динамічні властивості. У зв'язку із цим однією із проблем при експлуатації систем зберігання та подачі водню є ідентифікація значень їх узагальнених параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У переважній більшості випадків в якості узагальнених параметрів основного елемента систем зберігання та подачі водню, яким є газогенератор, використовується температура [3] або концентрація водню [4]. В якості такого параметра може використовуватись тиск в порожнині газогенератора [5]. У роботі [6] вказується на безпосереднє використання динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню для реалізації алгоритмів його контролю. При використанні в якості узагальненого параметра постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню для її визначення початкова

інформація міститься в часових [7] або частотних [8÷11] характеристиках газогенератора. У зв'язку із цим виникає необхідність у визначенні динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню. Стосовно до часової характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню, то в цьому випадку, як правило, використовується його реакція на сигнал у вигляді функції Хевісайда [7]. Ця часова характеристика може бути використана для одержання частотних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню [12]. В роботі [10] представлений метод визначення постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню із використанням такого підходу. Метод передбачає використання амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню на частоті, яка відповідає мінімуму похибки визначення такого часового параметра. Такий підхід обмежує використання цього методу, зокрема, це стосується випадків, коли допустима величина похибки є меншою від мінімальної величини, що визначається згідно із таким методом. У зв'язку із цим доцільним є створення методу визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню, реалізація якого передбачає використання апіорі заданого значення похибки його визначення.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка методу визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню за умови реалізації апіорі заданих вимог по точності.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- одержати математичний вираз для визначення часового параметра газогенератора;
- обґрунтувати вибір частотних параметрів із використанням критеріїв по точності;
- надати перелік послідовних процедур для визначення часового параметра газогенератора;
- вирішити тест-задачу для верифікації методу визначення часового параметра газогенератора.

Виклад основного матеріалу

Фазово-частотна характеристика газогенератора системи зберігання та подачі водню описується виразом [7]

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega \tau, \quad (1)$$

де τ – часовий параметр – постійна часу; ω – кругова частота.

Для часткової похідної від $\varphi(\omega)$ по частоті згідно (1) має місце

$$\frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \omega} = -\tau [1 + (\omega \tau)^2]^{-1}, \quad (2)$$

внаслідок чого вираз для часового параметра τ може бути записано наступним чином

$$\tau = -[1 + (\omega \tau)^2] \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \omega}. \quad (3)$$

Якщо врахувати, що

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \omega} &= \lim_{\Delta \omega \rightarrow 0} [\varphi(\omega + \Delta \omega) - \varphi(\omega)] \Delta \omega^{-1} \approx \\ &\approx [\varphi(\omega + \Delta \omega) - \varphi(\omega)] \Delta \omega^{-1} = A, \end{aligned} \quad (4)$$

то після об'єднання (3) та (4) будемо мати алгебраїчне рівняння для визначення часового параметра газогенератора

$$\omega^2 A \tau^2 + \tau + A = 0. \quad (5)$$

Величина часового параметра газогенератора визначається коренем цього алгебраїчного рівняння

$$\tau = \left[\left[1 - 4(\omega A)^2 \right]^{0,5} - 1 \right] [2\omega^2 A]^{-1}. \quad (6)$$

Цей вираз є математичною залежністю, яка використовується для визначення часового

параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню.

Для визначення частотного параметра ω скористаємось співвідношенням

$$\Delta \varphi = \text{abs} \left(\frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \tau} \right) \Delta \tau, \quad (7)$$

де $\Delta \varphi$ – абсолютна похибка визначення фазово-частотної характеристики газогенератора; $\Delta \tau$ – абсолютна похибка часового параметра.

Згідно (1) та (7) для відносної похибки $\delta \tau$ часового параметра газогенератора має місце вираз

$$\delta \tau = \Delta \tau \cdot \tau^{-1} = [1 + (\omega \tau)^2] (\omega \tau)^{-1} \Delta \varphi. \quad (8)$$

На рис. 1 наведені графічні залежності $\delta \tau = f(\omega)$ при $\Delta \varphi = \text{const}$. В якості величини τ використане його типові значення, що дорівнює 0,01 с [2,7].

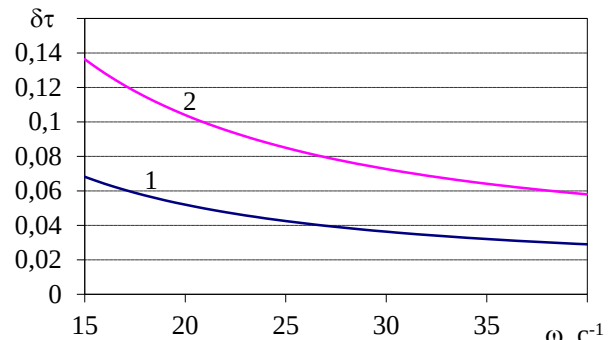


Рис.1. Залежність $\delta \tau = f(\omega)$ при $\tau = 0,01$ с: 1 – $\Delta \varphi = 0,01$; 2 – $\Delta \varphi = 0,02$

Вибір величини частотного параметра ω здійснюється за умов

$$\delta \tau \leq \delta \tau_{\text{доп}}; \Delta \varphi \leq \Delta \varphi_{\text{доп}}, \quad (9)$$

де $\delta \tau_{\text{доп}}$ – допустиме значення відносної похибки часового параметра газогенератора; $\Delta \varphi_{\text{доп}}$ – допустиме значення абсолютної похибки визначення фазово-частотної характеристики газогенератора.

Крім того, із (6) витікає, що необхідно виконання умови

$$\omega \leq 0,5A^{-1}. \quad (10)$$

Для вибору частотного параметра $\Delta\omega$ скористаємось виразом для відносної методичної похибки, яка обумовлена апроксимацією часткової похідної згідно (4). Цей вираз має вигляд

$$\begin{aligned} \delta &= \text{abs} \left[A \left[\frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \omega} \right]^{-1} - 1 \right] = \\ &= \text{abs} \left[1 + (\omega \tau)^2 \right] (\Delta\omega \tau)^{-1} \times \\ &\times \arctg \left[\Delta\omega \tau \left[1 + \omega(\omega + \Delta\omega) \tau^2 \right]^{-1} \right] - 1 \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 2 наведена графічна залежність $\text{abs}\delta = f(\omega, \Delta\omega)$, для якої $\tau = 0,01$ с.

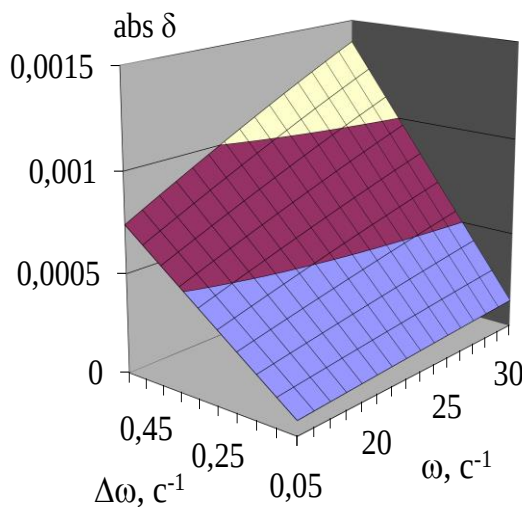


Рис.2. Залежність $\text{abs}\delta = f(\omega, \Delta\omega)$ при $\tau = 0,01$ с.

Вибір частотного параметра $\Delta\omega$ здійснюється за умови

$$\text{abs}\delta(\omega, \Delta\omega) \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (12)$$

де $\delta_{\text{доп}}$ – допустиме значення відносної методичної похибки.

В якості величини параметра ω при виборі частотного параметра $\Delta\omega$ використовується величина, обрана згідно умов (9).

Визначення виразу для фазово-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню доцільно проводити згідно [12]. У цьому випадку цей вираз має вигляд

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= -\arctg \left[\sum_{k=0}^n \Delta_k \sin[\omega(k+0,5)\Delta t] \right] \times \\ &\times \left[\sum_{k=0}^n \Delta_k \cos[\omega(k+0,5)\Delta t] \right]^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

де Δ_k – приріст тиску в порожнині газогенератора на інтервалі $\Delta t = \text{const}$ між $k+1$ -м та k -м вимірюваннями. Інтервал часу Δt обирається у відповідності до теореми Котельнікова-Найквіста-Шеннона.

Реалізація метода визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню полягає у виконанні послідовності наступних процедур:

- задають допустимі значення похибок $\delta\tau_{\text{доп}}$, $\delta_{\text{доп}}$ та $\Delta\varphi_{\text{доп}}$;
 - визначають фазово-частотну характеристику $\varphi(\omega)$ газогенератора, яка описується виразом (13);
 - за допомогою виразу (8) для відносної похибки часового параметра газогенератора або даних рис.1 і за умов (9) визначають величину частотного параметра;
 - за допомогою виразу (11) для відносної методичної похибки δ або даних рис.2 та за умови (12) визначають величину частотного параметра $\Delta\omega$;
 - згідно виразів (4) і (13) із використанням частотних параметрів ω та $\Delta\omega$ визначають величину A ;
 - перевіряють виконання умови (10);
 - згідно виразу (6) визначають величину часового параметра газогенератора;
 - перевіряють виконання першої умови (9).
- Для верифікації методу вирішимо тест-задачу. Якщо номінальне значення часового параметра дорівнює $0,01$ с, а $\delta\tau_{\text{доп}} = 5,0\%$, $\delta_{\text{доп}} = 0,1\%$, $\Delta\varphi = 0,01$, то згідно (8), (9) та рис.1 обираємо $\omega = 20 \text{ c}^{-1}$. Для параметра $\Delta\omega$ згідно (12) та рис.2 обираємо $\Delta\omega = 0,3 \text{ c}^{-1}$. У цьому випадку $A = -0,01$ с. Перевірка умови (10) дає $\omega \leq 50 \text{ c}^{-1}$, що не протирічить обраній величині частотного параметра. Для даних параметрів із (6) витікає, що $\tau = 0,0101 \text{ c}$, тобто відносна похибка визначення часового параметра газогенератора не перевищує $1,0\%$.

Висновки

1. Із використанням часткової похідної від виразу для фазово-частотної характеристики газогенератора системи зберігання та подачі водню по частоті одержано математичну залежність для визначення його часового параметра, яка є коренем алгебраїчного рівняння другого ступеня.

2. Здійснена апроксимація часткової похідної по частоті, для чого проведений вибір частотних параметрів, в основі якого лежить використання допускових критеріїв по точності. Обмеження накладаються на відносну похибку визначення часового параметра газогенератора, відносну методичну похибку апроксимації його часткової похідної від виразу для фазово-частотної характеристики по частоті та абсолютну похибку визначення фазово-частотної характеристики газогенератора.

3. Наданий перелік послідовних процедур, виконання яких забезпечує реалізацію методу визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню.

4. Для верифікації методу визначення часового параметра газогенератора системи зберігання та подачі водню вирішена тест-задача і показано, що відносна похибка при цьому не перевищує 1,0 %.

Література

1. Кривцова В.І. Неисчерпаемая энергия. Кн.4. Ветроводородная энергетика/ В.І. Кривцова, А.М. Олейников, А.П. Яковлев.- Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2007.- 606 с.
2. Абрамов Ю.О., Кривцова В.І., Соловей В.В. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / – Х.: 2002. – 277 с. – ISBN–966–03–1094–3.
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: 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, 5 (8-89), p. 16-21.doi: 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 – Х, Том 1 №161 (2021) – С.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 гідрореагуючих 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, Том 6, вип. 166, 2021, С. 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 – Х, Том 4, вип.164, 2021, С. 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 – Х, Том 3, вип.163, 2021, С. 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 – Х, Том 1, вип.165, 2022.*

12. Спосіб визначення динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню [Текст]: Пат. 109686 Україна: МПК G01B3/06 /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. Kharkov: Nat. aerospace un-t "KhAI", 606 p.
2. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Solovay V.V. (2002) Hydrogen storage and supply systems based on solids for on-board power plants, 277 p. ISBN–966–03–1094–3.
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: 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), p. 16-21.doi: 10.15587/1729-4061.2017.112200.
5. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Algorithm for the control of the technical station of the gas generator in the system for saving and supplying water in the context of their fire prevention. *Municipal economy of cities. Volume 1 No. 161. P.284-289.*
6. Abramov Yu.O., Sobina V.O., Zakora O.V., Feshchenko A.B. (2021) 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 /, 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.
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, 87 p.
8. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Phase methods for controlling gas generators in water saving and supply systems. *Municipal economy of cities. Volume 6, № 166, pp. 146-150.*
9. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Algorithm for determining the indicator of reliability of the

gas generator of the system for saving and supplying water *Municipal economy of cities*. Volume 4, № 164, P. 153-157.

10. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2021) Obstructing the method of assigning a constant hour to the gas generator of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*. Volume 3, №.163, P. 216-220.

11. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Mikhailyuk A.O. (2022) Amplitude methods and control of gas generators of the system for saving and supplying water. *Municipal economy of cities*. Volume 1, № 165, pp. 81-85.

12. Abramov Yu.O., Borisenko V.G., Mikhailyuk A.O. (2016) Method for determining the dynamic characteristics of the gas generator of the system for saving and supplying water : Pat. 109686 Ukraine: IPC G018B3/06, 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.

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: <https://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

Автор: КРИВЦОВА Валентина Іванівна
доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізико-математичних дисциплін Національний університет цивільного захисту України

E-mail - krivtsovav53@gmail.com

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

Автор: МИХАЙЛЮК Андрій Олександрович
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник докторантури

Національний університет цивільного захисту України

E mail - mihayluk.nuczu@gmail.com

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

METHOD OF DETERMINING THE TIME PARAMETER OF THE GAS GENERATOR HYDROGEN STORAGE AND SUPPLY SYSTEMS

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

The method of determining the hourly parameter of the main element of the system for saving and supplying water, the gas generator, has been developed. The method is based on the approximation of a partial frequency response for the phase-frequency characteristic of the gas generator of the water saving system in terms of frequency. This approximation is used to construct a mathematical dependence, which is used in determining the time parameter of the gas generator. In the quality of the cob data, when the hourly parameter of the gas generator is determined, the phase-frequency characteristic of the gas generator and the allowable values of the parameters of the characteristics and the parameters of the hourly parameter of the gas generator and the approximation of the first dynamic characteristic are recorded. To determine the frequency parameters, tolerance criteria for accuracy are used, with the help of such gains of analytical reliability of these frequency parameters in the form of variances. It is shown that the phase-frequency characteristic of the gas generator of the system for saving and supplying water is mainly carried out from the variation of the transitional function. For this purpose, an array of experimental data, obsessions, as a result of vimiryuvan in a discrete moment and time, is scored by the Kotelnikov-Nyquist-Shannon theorem. For the implementation of the method, a sequence of procedures was induced to ensure the determination of the hourly parameter of the gas generator. Verification of the method is marked by the way of the completion of the test task. It is shown that the change in the hourly parameter of the gas generator of the system for saving and supplying water does not exceed 1.0%.

Keywords: water supply saving system, gas generator, clock parameter, phase-frequency characteristic.