УДК 661.96:614.84 **DOI 10.33042/2522-1809-2021-3-163-216-220**

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ЧАСУ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

Обґрунтовано метод визначення динамічного параметра – постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню на основі гідрореагуючого складу. В основі методу лежить використання амплітудно-частотної характеристики газогенератора системи зберігання і подачі водню. Метод включає реалізацію трьох етапів. На першому етапі здійснюється одержання математичної залежності постійної часу газогенератора від його статичного параметра та амплітудно-частотної характеристики на фіксованій частоті. На другому етапі обґрунтовується вибір цієї фіксованої частоти. Такий вибір здійснюється за умови забезпечення мінімальної похибки визначення постійної часу газогенератора. Для визначення статичного параметра газогенератора та значення його амплітудно-частотної характеристики на фіксованій частоті використовується масив даних, який формується шляхом вимірювань значень перехідної функції газогенератора через рівні моменти часу. Ці інтервали часу обираються згідно теореми Котельнікова-Найквіста-Шеннона. Амплітудно-частотна характеристика газогенератора системи зберігання та подачі водню визначається чисельним шляхом. За результатами досліджень наведена ітераційна процедура для визначення постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню. Надані рекомендації по використанню цієї процедури. Вибір величини постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню здійснюється із використанням допускового критерію.

Ключові слова: *газогенератор, система зберігання та подачі водню, постійна часу, амплітудно-частотна характеристика.*

Постановка проблеми

Скорочення природних ресурсів та малоефективне їх використання, погіршення якості навколишнього середовища – все це є складовими сучасної паливно-екологічної кризи. Одним із шляхів для зміни сучасної ситуації в позитивному напрямку є використання альтернативних палив, зокрема, водню. Ефективне використання водню визначається технічним рівнем систем його одержання, зберігання та подачі [1]. Дуже важливим показником таких систем є рівень їх пожежонебезпеки, який забезпечується системою організаційних та технічних методів і засобів. До числа таких методів та засобів належить пожежна профілактика. В зв'язку із цим однією із проблем при експлуатації водневих систем є забезпечення необхідного рівня ефективності організаційно-технічних заходів їх пожежної профілактики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Забезпечення небезпечної експлуатації систем із використанням водню можливо за умови, що їх параметри і характеристики гарантують справний стан всіх їх елементів [2]. В роботі [3] звертається увага на необхідність вираховування при проектуванні водневих систем показників пожежонебезпеки. Одним із таких показників є ймовірність виникнення пожежі в системі. В цій роботі наведений алгоритм оцінки рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню, в основі якого лежить використання ймовірності безвідмовної роботи елементів (пристроїв), що унеможливлюють виникнення пожежі. В роботі [4] вказується, що для забезпечення заданого рівня ймовірності безвідмовної роботи пристроїв, систем тощо, використовується контроль їх технічного стану. Стосовно до основного елемента систем зберігання та подачі водню газогенератора в [5] наведені результати досліджень по розробці алгоритмів контролю технічного стану такого елемента системи. Найбільш поширеними параметрами, що контролюються, є температура [6] та концентрація водню [7]. Як правило, алгоритми контролю систем зберігання та подачі водню є тривіальними [8] і передбачають контроль одного-двох параметрів технологічного процесу генерації водню. В останній час з'явились результати досліджень щодо розробки алгоритмів контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню, які основані на використанні динамічних властивостей таких генераторів. Такий підхід до побудови алгоритмів

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

контролю технічного стану газогенераторів є перспективним і його доцільно розвивати. В зв'язку з цим актуальною є проблема по обґрунтуванню методів та засобів контролю систем зберігання та подачі водню і їх елементів.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є обґрунтування методу визначення постійної часу газогенератора системи зберігання і подачі водню.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- одержати аналітичний опис для постійної часу газогенератора;
- обґрунтувати вибір параметрів для визначення постійної часу газогенератора;
- надати рекомендації стосовно процедури визначення постійної часу газогенератора.

Виклад основного матеріалу

Метод визначення постійної часу газогенератора. Газогенератор системи зберігання та подачі водню на основі гідрореагуючого складу має передаточну функцію виду [9]

$$W(p) = K(\tau p + 1)^{-1}, \qquad (1)$$

K, τ – коефіцієнт передачі та постійна часу газогенератора відповідно.

Такій передаточній функції відповідає амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) $A(\omega)$ газогенератора

$$A(\omega) = K\left[1 + (\omega\tau)^2\right]^{-0,5}, \qquad (2)$$

де ω – кругова частота.

Із (2) витікає вираз для постійної часу газогенератора

$$\tau = \omega^{-1}\left[\left[K[A(\omega)]^{-1}\right]^2 - 1\right]^{0,5}. \qquad (3)$$

Згідно (1) постійна часу τ повністю характеризує динамічні властивості газогенератора. Визначення величини параметра τ у відповідності із (3) обумовлює необхідність в одержанні інформації стосовно параметра K та значення АЧХ газогенератора на частоті ω. Для вибору частоти ω скористуємося залежністю між похибкою ΔA АЧХ газогенератора та похибкою визначення його постійної часу $\Delta\tau$, яка має вигляд

$$\Delta A = \frac{\partial A(\omega)}{\partial \tau}\Delta\tau = -K\omega\tau\left[1 + (\omega\tau)^2\right]^{-1,5}\Delta\tau. \qquad (4)$$

В подальшому будемо розглядати абсолютну величину похибки ΔA. Із урахуванням цього із (4) витікає

$$\Delta\tau = (\omega\tau)^{-1}\left[1 + (\omega\tau)^2\right]^{1,5}\delta a, \qquad (5)$$

де $\delta a = K^{-1}\Delta A$ – відносна похибка АЧХ газогенератора.

Мінімальній величині похибки $\Delta\tau$ буде відповідати частота ω_0, величина якої визначається рішенням рівняння

$$\frac{\partial\Delta\tau}{\partial\omega} = \left[1 + (\omega\tau)^2\right]^{0,5}\left[3\tau - \left(\omega^2\tau\right)^{-1}\left[1 + (\omega\tau)^2\right]\right]\delta a = 0. \qquad (6)$$

Рішенням цього рівняння є

$$\omega_0 = 0,5\sqrt{2}\tau^{-1}. \qquad (7)$$

Для характерних величин параметрів газогенератора величина його постійної часу дорівнює 0,01с [10]. Це означає, що величина частоти ω_0 повинна дорівнювати $70\,\text{с}^{-1}$.

Одержання інформації стосовно величини K та $A(\omega_0)$, що входять до виразу (3), можливо із використанням традиційних підходів. При цьому необхідно організувати серію вимірювань в стаціонарному режимі роботи газогенератора, а також забезпечити вимірювання тиску в порожнині газогенератора в динамічному режимі його роботи. Можливий інший підхід, який оснований на використанні інформації, яку несе перехідна функція газогенератора [11]. З цією метою вхідний сигнал газогенератора – площу його вихідного отвору $F(t)$ змінюють згідно із виразом

$$F(t) = F_0 \cdot 1(t), \qquad (8)$$

де F_0 – const; $1(t)$ – функція Хевісайда.

В кожний із моментів часу, які відстають один від одного на величину Δt, здійснюють вимірювання приросту тиску Δ_k в порожнині газогенератора

$$\Delta_k = P_{k+1} - P_k,\ k = \overline{0,n}. \qquad (9)$$

Величину інтервалу часу Δt вибирають у відповідності до теореми Котельнікова-Найквіста-Шеннона [12], тобто

$$\Delta t = 0{,}5 \cdot f_m^{-1}, \qquad (10)$$

f_m – максимальне значення частоти спектру функції $P(t)$.

Для тиску в порожнині газогенератора можна записати вираз

$$P(t) = \sum_{k=0}^{n} \Delta_k 1[t - (k + 0{,}5)\Delta t]. \qquad (11)$$

Якщо застосувати до (11) інтегральне перетворення Лапласа, то буде мати місце

$$P(S) = S^{-1} \sum_{k=0}^{n} \Delta_k \exp[-S(k + 0{,}5)\Delta t] = S^{-1} F_0 W(S), \qquad (12)$$

де S – комплексна змінна; $W(S)$ – передаточна функція газогенератора.

Згідно до (12) для комплексної передаточної функції газогенератора буде мати місце вираз

$$W(jw) = F_0^{-1} \sum_{k=0}^{n} \Delta_k \begin{bmatrix} \cos[\omega(k + 0{,}5)\Delta t] - \\ - j\sin[\omega(k + 0{,}5)\Delta t] \end{bmatrix}, \qquad (13)$$

де j – уявна одиниця.

Із цього виразу витікають вирази для коефіцієнта передачі K та АЧХ $A(\omega)$ газогенератора, які мають вигляд

$$A(\omega) = F_0^{-1} \left[\left[\sum_{k=0}^{n} \Delta_k \cos[\omega(k + 0{,}5)\Delta t] \right]^2 + \left[\sum_{k=0}^{n} \Delta_k \sin[\omega(k + 0{,}5)\Delta t] \right]^2 \right]^{0{,}5}; \qquad (14)$$

$$K = A(0) = F_0^{-1} \sum_{k=0}^{n} \Delta_k. \qquad (15)$$

Слід зазначити, що такий підхід для визначення $A(\omega)$ та K оснований на одержанні інформації в динамічному режимі роботи газогенератора, зокрема, на використанні його перехідної функції.

Для визначення постійної часу газогенератора використовується вираз (3) спільний із виразами (7), (19) та (18). При цьому в виразі (7) в якості параметра τ використовується номінальна (паспортна) величина постійної часу, а в виразі (14) в якості частоти ω – частота ω_0.

Після визначення таким чином величини постійної часу газогенератора τ_1 здійснюється перевірка умов

$$|\tau_1 - \tau| \le \varepsilon, \qquad (16)$$

де ε – апріорі задане мале число.

Якщо умова (16) не виконується, то в виразі (7) замість параметра τ використовується параметр τ_1 і процедура визначення постійної часу газогенератора повторюється. Після кожної такої процедури перевіряється виконання умови

$$|\tau_m - \tau_{m-1}| \le \varepsilon, \qquad (17)$$

де m – номер процедури.

При виконанні умови (17) за визначену величину постійної часу газогенератора приймається значення τ_m.

Висновки

Стосовно до газогенератора системи зберігання та подачі водню одержаний математичний вираз для його постійної часу, який включає коефіцієнт передачі, значення амплітудно-частотної характеристики на апріорі заданій частоті та значення цієї частоти.

Показано, що вибір апріорі заданої частоти здійснюється за умови мінімізації похибки величини постійної часу газогенератора і величини цієї частоти є обратнопропорційною номінальній величині постійної часу.

Для визначення величини коефіцієнта передачі газогенератора та значення його амплітудно-частотної характеристики на апріорі заданій частоті доцільно використовувати інформацію стосовно перехідної функції газогенератора. Така інформація має вигляд масиву даних, що визначаються вимірюванням значень перехідної функції газогенератора через інтервали часу, які обираються згідно до теореми Котельнікова-Найквіста-Шеннона.

Розроблені рекомендації стосовно процедури визначення величини постійної часу газогенератора, які зведені до використання математичного опису постійної часу шляхом реалізації ітераційної процедури.

Література

1. Baliabina A.A., Dli M.I., Drozdova N.V. Hydrogen energy and development prospects // Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology. 2015. Inssue 22: 37–41.

2. Sorensen B. Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development // Int. J. Energy Res.2008.32. Inssue 5: 367–368.

3. Абрамов Ю.О., Кривцова В.И., 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.

4. Dmitriev A.L., Ikonnikov V.K. Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidations // Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology. 2017. Inssue 10: 75–85.

5. Абрамов Ю.А. Модели и характеристики генераторов водорода на основе гидрореагирующих составов / Ю.А. Абрамов, В.Г. Борисенко, В.И. Кривцова. – Х.: НУГЗУ, 2018. – 72 с.

6. 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

7. 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 Enterprisse Technologies, Industry Control Systems, 2017, 5 (8-89), p. 16–21.doi: 10.15587/1729-4061.2017.112200.

8. Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., Baskar P., Annamalai K. Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas-A Futuristic Fuel for Internal Combustion Engines // Thermal Sci. 2011. 15: 1145–1154.

9. Абрамов Ю.А. Алгоритм контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода / Ю.А. Абрамов, В.Г. Борисенко, В.И. Кривцова / Проблеми надзвичайних ситуацій – Х.: НУЦЗУ, 2017. – Вип. 25. – С.3–7.

10. Абрамов Ю.А. Мониторинг технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, А.С. Фуников / Проблеми надзвичайних ситуацій – Х.: НУЦЗУ, 2016. – Вип. 24. – С.3–8.

11. Спосіб визначення динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню : Пат. 109686 Україна: МПК G018B3/06 /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.

12. Биккенин Р.Р. Теория электрической связи/ Р.Р. Биккенин, М.Н. Чесноков.– М.: Академия, 2010.– 329с.

References

1. Baliabina A.A., Dli M.I., Drozdova N.V. Hydrogen energy and development prospects // Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology. 2015. Inssue 22: 37–41.

2. Sorensen B. Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development // Int. J. Energy Res.2008.32. Inssue 5: 367–368.

3. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Solovey V.V. Solid-based hydrogen storage and delivery systems for onboard power plants / – Kh.: 2002. – 277p. – ISBN–-966–03–1094–3.

4. Dmitriev A.L., Ikonnikov V.K. Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidations // Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology. 2017. Inssue 10: 75–85.

5. Abramov Yu.A. Models and characteristics of hydrogen generators based on hydroreactive compositions / Yu.A. Abramov, V.G. Borisenko V.I. Krivtsova. - Kh .: NUGZU, 2018 . – 72 p.

6. 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

7. 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 Enterprisse Technologies, Industry Control Systems, 2017, 5 (8–89), p. 16–21. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112200.

8. Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., Baskar P., Annamalai K. Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas-A Futuristic Fuel for Internal Combustion Engines // Thermal Sci. 2011. 15: 1145–1154.

9. Abramov Yu.A. Algorithm for monitoring the technical condition of the gas generator of the hydrogen storage and supply system / Yu.A. Abramov, V.G. Borisenko V.I. Krivtsova / Problems of superficial situations. – Kh. : NUTSZU, 2017. – Vyp. 25. – p. 3–7.

10. Abramov Yu.A. Monitoring of the technical condition of the gas generator of the hydrogen storage and supply system / Yu.A. Abramov, V.I. Krivtsova, A.S. Funikov / Problems of superficial situations. – Kh .: NUTSZU, 2016. – Vip. 24. – p. 3–8.

11. Methods for determining the dynamic characteristics of the gas generator of the system for securing and supplying water : Pat. 109686 Ukraine: IPC G018B3 / 06 / Abramov Yu.O., Borisenko V.G., Krivtsova V.I., application no. that patent holder of the National University of Civil Society of Ukraine. - No. 201603531; application 4.04.16; publ. 08.25.16, Bul. No. 16.

12. Bikkenin R.R. Theory of electrical communication / R.R. Bikkenin, M.N. Chesnokov. – M. : Academy, 2010. – 329 p.

Рецензент: д. т. н., с. н. с., начальник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру Р.І. Шевченко, 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 факультету техногенно-екологічної безпеки
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, ад`юнктури
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – mihayluk.nuczu@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4116-164X

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF DETERMINATION OF THE CONSTANT TIME OF THE GAS GENERATOR OF THE SYSTEM OF STORAGE AND SUPPLY OF HYDROGEN

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk
National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

The method of determining the dynamic parameter - the time constant of the gas generator of the storage and supply of hydrogen on the basis of the hydro-reactive composition is substantiated. The method is based on the use of the amplitude-frequency characteristics of the gas generator of the storage and supply system of hydrogen. The method involves the implementation of three stages. At the first stage, the mathematical dependence of the gas generator time constant on its static parameter and amplitude-frequency characteristic at a fixed frequency is obtained. In the second stage, the choice of this fixed frequency is justified. This dependence includes the value of the amplitude-frequency characteristic of the gas generator of the storage and supply of hydrogen at a fixed frequency, the static parameter of such a gas generator – its transmission coefficient, and the value of the fixed frequency. In the second stage, the choice of this fixed frequency is justified. This choice is made provided that the minimum error in determining the time constant of the gas generator. To determine the static parameter of the gas generator and the value of its amplitude-frequency characteristic at a fixed frequency, an array of data is used, which is formed by measuring the values of the transient function of the gas generator through equal moments of time. These time intervals are chosen according to the Kotelnikov-Nyquist-Shannon theorem. The amplitude-frequency characteristic of the gas generator of the hydrogen storage and supply system is determined numerically. According to the research results, an iterative procedure for determining the time constant of the gas generator of the hydrogen storage and supply system is given. Recommendations for using this procedure are given. The choice of the time constant of the gas generator of the hydrogen storage and supply system is made using the tolerance criterion.

Keywords: *gas generator, hydrogen storage and supply system, time constant, amplitude-frequency characteristic.*