

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

АМПЛІТУДНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ГАЗОГЕНЕРАТОРІВ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ

Розглянуті методи контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню, в основі яких лежить використання їх амплітудно-частотних характеристик. Перший метод контролю полягає в використанні інформації на апіорі заданій частоті стосовно постійної та гармонічної складових тиску в порожнині газогенераторів. Апіорі задана частота обирається за умови, що її значення дорівнює зворотній величині постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню. Другий метод контролю передбачає формування тест-сигналів на двох апіорі заданих частотах і визначення за допомогою значень амплітудно-частотних характеристик газогенераторів на цих частотах величин їх постійних часу. Показано, що для реалізації цих методів контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню необхідно забезпечити вимірювання значень їх амплітудно-частотних характеристик або їх еквівалентів у вигляді амплітудних значень тиску в порожнині цих газогенераторів. В якості критеріїв для визначення технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню використовується допускові критерії. Третій метод контролю газогенераторів оснований на використанні їх фізичних моделей, які описуються оператором, що співпадає із математичною моделлю газогенераторів систем зберігання та подачі водню. В цьому випадку реалізація методу контролю газогенераторів зводиться до порівняння значень амплітудно-частотних характеристик газогенератора та його фізичної моделі на апіорі заданих частотах. Відмічається, що при виборі методу контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню в першу чергу слід надати перевагу третьому із розглянутих методів.

Ключові слова: газогенератор, система зберігання та подачі водню, контроль, амплітудно-частотна характеристика.

Постановка проблеми

Водень є одним із перспективних палив на шляху по зміні сучасної ситуації із світовою енергетикою [1]. Ефективність використання водню визначається окрім його фізико-хімічних характеристик і характеристиками систем зберігання та подачі [2]. До числа важливих характеристик таких водневих систем належить рівень їх пожежонебезпеки, який забезпечується організаційними і технічними методами. Одним із таких методів є проведення контролю технічного стану систем зберігання та подачі водню, що є однією із складових при реалізації алгоритмів роботи системи пожежної профілактики. В зв'язку із цим однією із проблем при експлуатації водневих систем є підвищення ефективності їх систем експлуатації шляхом удосконалення методів та засобів пожежної профілактики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нормальна експлуатація систем зберігання та подачі водню можлива за умов забезпечення їх параметрів та характеристик, які гарантують справний стан всіх їх елементів [3]. До таких

характеристик відноситься рівень пожежонебезпеки, оцінка якого здійснюється із використанням показників безвідмовності елементів систем зберігання та подачі водню. Основним елементом таких систем є газогенератор. Для забезпечення нормативного рівня ймовірності безвідмовної роботи газогенераторів систем зберігання та подачі водню використовується контроль їх технічного стану [4]. При контролі технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню в переважній більшості в якості інформаційних параметрів використовується температура [5] або концентрація водню [6]. В роботі [7] показано, що в якості інформаційного параметра при контролі газогенераторів може використовуватися тиск в його порожнині. Як правило, переважна більшість методів контролю газогенераторів орієнтовані на реалізацію алгоритмів в часовій області [8]. В останній час з'явилися роботи, в яких розглядаються частотні методи контролю основного елемента систем зберігання та подачі водню – газогенератора [9]. В роботі [10] обґрунтовується частотний метод контролю газогенераторів, в основі якого лежить використання їх фазово-частотних характеристик. Внаслідок того,

що іншою частотною характеристикою газогенераторів систем зберігання та подачі водню є їх амплітудно-частотна характеристика, то доцільно розглянути методи контролю газогенераторів із використанням такої частотної характеристики.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є узагальнення методів контролю газогенераторів систем зберігання та подачі водню, в основі яких лежить використання їх амплітудно-частотної характеристики.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити методи контролю газогенераторів, в основі яких лежить вимірювання значень їх амплітудно-частотних характеристик на апріорі заданих частотах;

- визначити метод контролю газогенераторів, який не потребує вимірювання значень їх амплітудно-частотних характеристик.

Виклад основного матеріалу

Частотні методи контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню розділяються на [10]:

- фазові;
- амплітудні;
- амплітудно-фазові.

Розглянемо амплітудні методи контролю газогенераторів.

При зміні площі вихідного отвору газогенератора системи зберігання та подачі водню по гармонічному закону із апріорі заданими амплітудою F_m та частотою $\omega_0 = \tau^{-1}$, де τ – постійна часу газогенератора, тобто при

$$F(t) = F_0 + F_m \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

тиск в його порожнині буде описуватись виразом

$$P(t) = P_0 + P_m \sin[\omega_0 t + \varphi(\omega_0)], \quad (2)$$

де $F_0 = \text{const}$; $P_0 = \text{const}$; $\varphi(\omega_0)$ – фаза.

Згідно із визначенням амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) газогенератора можна записати

$$P_0 P_m^{-1} = F_0 A(0) [F_m A(\omega_0)]^{-1}, \quad (3)$$

де $A(0)$, $A(\omega_0)$ – значення АЧХ газогенератора на частоті $\omega = 0$ та $\omega = \omega_0$ відповідно.

Для газогенератора системи зберігання та подачі водню в першому наближенні має місце [1]

$$A(0) = K; A(\omega_0) = 2^{-0,5} K, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт передачі, внаслідок чого вираз (3) трансформується наступним чином

$$P_0 P_m^{-1} = 2^{0,5} F_0 F_m^{-1}. \quad (5)$$

Із (5) витікає, що алгоритм контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню включає вимірювання параметрів P_0 та P_m (на апріорі заданій частоті ω_0) при апріорі заданих параметрах F_0 та F_m . В якості критерію при контролі технічного стану газогенераторів доцільно використовувати вираз [11]

$$\left| P_0 P_m^{-1} - 2^{0,5} F_0 F_m^{-1} \right| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

де ε – апріорі задане мале число.

Фізично це означає, що технічно справному газогенератору системи зберігання та подачі водню відповідає розташування його фігуративної точки усередині області, яка визначається величиною ε , та центр якої має координати $\omega_0, 2^{-0,5} K$ на АЧХ газогенератора.

Для підвищення достовірності результату контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню в [12] запропоновано змінювати площу $F(t)$ вихідного отвору газогенератора за синусоїдальним законом на двох апріорі заданих частотах ω_1 та ω_2 (при фіксованій амплітуді F_m), тобто

$$F_1(t) = F_m \sin \omega_1 t; F_2(t) = F_m \sin \omega_2 t. \quad (7)$$

Внаслідок того, що АЧХ газогенератора описується виразом

$$A(\omega) = P_m(\omega) F_m^{-1} = K (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1}, \quad (8)$$

то має місце співвідношення

$$K^2 = A^2(\omega_1) (1 + \omega_1^2 \tau^2) = A^2(\omega_2) (1 + \omega_2^2 \tau^2), \quad (9)$$

Із (9) витікає вираз для постійної часу τ газогенератора

$$\tau = \omega_2^{-1} \left[\frac{A^2(\omega_2) - A^2(\omega_1)}{A^2(\omega_1) \omega_1^2 - A^2(\omega_2) \omega_2^2} \right]^{0,5}. \quad (10)$$

Якщо врахувати, що

$$A(\omega_i) = P_{im} F_m^{-1}; i = 1, 2, \quad (11)$$

то вираз (10) буде трансформовано наступним чином

$$\tau = \omega_2^{-1} \left[\left[1 - (P_{2m} P_{1m}^{-1})^2 \right] \times \left[(P_{2m} P_{1m}^{-1})^2 - (\omega_1 \omega_2^{-1})^2 \right]^{-1} \right]^{0,5}. \quad (12)$$

Із (12) витікає, що для контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню необхідно забезпечити вимірювання амплітуд P_{im} тиску в порожнині газогенератора за умови зміни площі $F_1(t)$ його вихідного отвору згідно виразів (7). Результат контролю визначається за допомогою критерію

$$|\tau - \tau_0| \leq \varepsilon, \quad (13)$$

де τ_0 – нормативне значення постійної часу газогенератора.

Особливістю обох алгоритмів контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню є необхідність у вимірюванні значень тиску в порожнині газогенераторів (постійної складової та амплітудного значення). Крім того, в першому випадку вимірювання амплітудного значення тиску в порожнині газогенераторів здійснюється на частоті, яка є зворотною відносно її постійної часу. Внаслідок цього має місце високий ступінь невизначеності стосовно технічного стану газогенераторів системи зберігання та подачі водню на частотах, менших відносно частоти $\omega_0 = \tau^{-1}$. Така особливість не є характерною для другого алгоритму контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню, внаслідок чого йому слід надати перевагу.

Слід зазначити, що принципово можливо уникнути необхідності у вимірюванні значень тиску в порожнині газогенераторів систем зберігання та подачі водню. Для цього використовується фізична модель газогенератора [13], яка описується оператором M .

При зміні площі вихідного отвору газогенератора за гармонічним законом

$$F(t) = F_m \sin \omega t, \quad (14)$$

тиск в його порожнині буде описуватись виразом

$$P(t) = P_m \sin[\omega t + \varphi(\omega)] = F_m A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)], \quad (15)$$

де $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ – значення АЧХ та фазово-частотної характеристики ФЧХ на частоті ω .

Сигнал на виході фізичної моделі газогенератора буде мати опис

$$u(t) = M[F(t)] = F_m A_M(\omega) \sin[\omega t + \varphi_M(\omega)], \quad (16)$$

де $A_M(\omega)$, $\varphi_M(\omega)$ – значення АЧХ та ФЧХ фізичної моделі газогенератора та частоті ω .

Алгоритм контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню в цьому випадку зводиться до порівняння значень $A(\omega)$ та $A_M(\omega)$ або P_m та P_M , де P_m – амплітуда гармонічного сигналу на виході фізичної моделі газогенератора, та використанні критерію

$$|A(\omega) - A_M(\omega)| \leq \varepsilon, \quad (17)$$

або

$$|P_m - P_M| \leq \varepsilon. \quad (18)$$

Технічна реалізація такого варіанту алгоритму контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню є простіша у порівнянні із алгоритмом, який оснований на використанні виразів (12) та (13). Зокрема, технічна реалізація фізичної моделі, яка описується оператором M , а також реалізацією умови (18) може бути здійснена на основі операційних підсилювачів [14].

При виборі методу контролю газогенераторів системи зберігання та подачі водню в першу чергу слід віддати перевагу методу, який оснований на використанні їх фізичних моделей, які описуються оператором M . При цьому необхідно забезпечити процес контролю на різних частотах, величини яких перекривають їх робочий діапазон.

Висновки

Показано, що вимірювання значень амплітудно-частотної характеристики газогенераторів систем зберігання та подачі водню або значень амплітуд тиску в порожнині газогенераторів на одній або на двох апіорі заданих частотах за умови дії тест-сигналу у вигляді гармонічної функції, забезпечують одержання інформації стосовно їх технічного стану.

Показано, що використання фізичної моделі газогенератора системи зберігання та подачі водню

в алгоритмі контролю його технічного стану дозволяє реалізувати такий алгоритм без вимірювання значень амплітудно-частотних характеристик газогенератора. Алгоритм контролю в такому випадку реалізується шляхом порівняння значень амплітудно-частотних характеристик газогенератора і його фізичної моделі на апіорі заданій частоті.

Література

1. 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 : Фолио, 2002. – 277 с.
2. Кривцова В.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 4. Ветро-водородная энергетика / В.И. Кривцова, А.М. Олейников, А.П. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2007. – 606 с.
3. Sorensen B. Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development // *Int. J. Energy Res.* – 2008. – Vol. 32, Is. 5. – Pp. 367–368. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.1370>
4. Dmitriev A.L. Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidations / Dmitriev A.L., Ikonnikov V.K. // *Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology.* – 2017. – Vol. 10. – Pp. 75–85.
5. 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>
6. 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://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200>
7. 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>
8. Nanthagopal K. Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas-A Futuristic Fuel for Internal Combustion Engines / Nanthagopal K., Subbarao R., Elango T., Baskar P., Annamalai K. // *Thermal Sci.* – 2011. – Vol. 15. – Pp. 1145–1154. DOI: <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI100730044N>
9. Abramov Yu. The synthesis of control algorithm over a technical condition of the hydrogen generators based on hydro-reactive compositions / Yu. Abramov, A. Basmanov, V. Krivtsova, A. Mikhayluk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems.* – 2018. – 3(2–93). – Pp. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131020>
10. 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>
11. Абрамов Ю.А. Мониторинг технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, А.С. Фуников // *Проблемы надзвичайних ситуацій.* – 2016. – Вип. 24. – С. 3–8.
12. Абрамов Ю.О. Контроль технічного стану генераторів водню як профілактика їх пожежної безпеки / Ю.О. Абрамов, В.Г. Борисенко, В.І. Кривцова // *Проблеми пожежної безпеки.* – 2019. – Вип. 45. – С. 3–6.
13. Спосіб контролю технічного стану газогенераторів системи зберігання та подачі водню: Пат. 134666 Україна: МПК G01L 23/00, B01J 7/00/ Абрамов Ю.О., Кривцова В.І., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201900131; заяв. 03.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10.
14. Аналоговые схемы устройств автоматики. URL: <https://studopedia.ru/1-125511-analogovie-swemi-ustroystvy-avtomatiki.html>

References

1. Abramov, Yu.O., Krivtsova, V.I., Solovey, V.V. (2002). Hydrogen storage and supply systems based on solids for onboard power plants. Kharkov, Folio. [in Russian]
2. Krivtsova, V.I., Oleinikov, A.M., Yakovlev, A.P. (2007). Inexhaustible energy. Book 4. Wind and hydrogen energy. Kharkov, National Aerospace University "KhAI". [in Russian]
3. Sorensen, B. (2008). Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development. *Int. J. Energy Res.* 32(5), 367–368. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.1370>
4. Dmitriev, A.L., Ikonnikov, V.K. (2017). Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidations. *Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology*, 17(10), 75–85.
5. 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>
6. 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://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200>
7. Abramov, Y., Krivtsova, V., Mikhayluk, 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]
8. Nanthagopal, K., Subbarao, R., Elango, T., Baskar, P., Annamalai, K. (2011). Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas-A Futuristic Fuel for Internal Combustion Engines. *Thermal Sci.* 15, 1145–1154. DOI: <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI100730044N>
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., Krivtsova, V., Mikhayluk, 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]
11. Abramov, Yu.A., Krivtsova, V.I., Funikov, A.S. (2016). Monitoring of the technical condition of the gas generator of the hydrogen storage and supply system. *Problems of epidemiological situations*, 24, 3–8. [in Russian]
12. Abramov, Yu.O., Borisenko, V.G., Krivtsova, V.I. (2019). Control of technical station of generators in water as prevention of fire safety. *Problems of fire safety*, 45, 3–6. [in Ukrainian]
13. Abramov, Yu.O., Krivtsova, V.I. (2019). *Method for controlling the technical station of the gas generator in the system for saving and supplying water* (Patent 134666 Ukraine, IPC G01L 23/00, B01J 7/00/, No 201900131). [in Ukrainian]
14. Analog circuits of automation devices. URL: <https://studopedia.ru/1-125511-analogovye-swemi-ustroystv-avtomatiki.html>

Рецензент: д. т. н., проф., 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
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, ад'юнктури Національний університет цивільного захисту України
E-mail – mihayluk.nucz@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

AMPLITUDE METHODS FOR CONTROL OF GAS GENERATORS WATER SAVING SYSTEMS

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

The methods of control of the technical station of gas generators of systems for saving and supplying water are examined, which are based on the variation of their amplitude-frequency characteristics. The first method of control is based on a variety of information on the a priori set frequency of hundred and fifty constant and harmonic warehouse vices in empty gas generators. A priori, the frequency is set to be collected for the mind, which is the most important turning point for the constant hour of the gas generator of the water saving system. Another method of control is the transmission of the formation of test signals at two a priori given frequencies and the assignment of an additional value of the amplitude-frequency characteristics of gas generators at these frequencies of the values of their constant hours. It is shown that for the implementation of these methods in the control of the technical station of gas generators in systems for saving water supply, it is necessary to ensure the value of their amplitude-frequency characteristics or their equivalents in terms of the amplitude values of the vice in empty gas generators. In accordance with the criteria for the designation of a technical plant for gas generators of systems for saving and supplying water, tolerance criteria are met. The third method for controlling gas generators based on different physical models, as described by the operator, which results from the mathematical model of gas generators in systems for saving and supplying water. In this way, the implementation of the method of control of gas generators is carried out until the values of the amplitude-frequency characteristics of the gas generator of that physical model are equal at a priori set frequencies. It should be noted that when choosing a control method for a technical station of gas generators in systems for saving and supplying water to the first line, one should give precedence to the third of the considered methods.

Keywords: gas generator, system for saving and supplying water, control, amplitude-frequency characteristic.