УДК 661.96:614.84 **DOI 10.33042/2522-1809-2021-6-166-146-150**

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

Національний університет цивільного захисту України, Україна

ФАЗОВІ 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 фазово-частотних характеристик. Методи контролю газогенераторів розділені на дві групи в залежності від математичних моделей, які використовуються для опису роботи таких газогенераторів. Показано, що при використанні в якості такої математичної моделі передаточної функції газогенератора у вигляді інерційної ланки, можлива реалізація алгоритмів контролю як за допомогою його фазово-частотної характеристики, так і за допомогою його постійної часу. В першому випадку здійснюється вимірювання фазово-частотної характеристики на апріорі заданій частоті. В другому випадку таке обмеження відсутнє. При використанні в якості математичної моделі газогенератора передаточної функції у вигляді дробово-раціональної функції другого порядку реалізація алгоритмів його контролю може здійснюватись безпосередньо за допомогою фазово-частотних характеристик газогенератора. При такій реалізації алгоритмів контролю технічного стану газогенераторів вимірювання значень їх фазово-частотних характеристик здійснюється на декількох частотах. Такий підхід для реалізації контролю газогенераторів дозволяє підвищити достовірність стосовно його результатів. Всі методи контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню орієнтовані на використання допускових критеріїв. Параметрами допускових критеріїв можуть виступати, як величини постійних часу газогенераторів систем зберігання та подачі водню, так і фіксовані значення фазово-частотних характеристик таких газогенераторів. В останньому випадку реалізуються алгоритми контролю, які перекривають весь робочий діапазон частот газогенераторів.

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

Постановка проблеми

Одним із перспективних шляхів по зміні сучасної ситуації у світовій енергетиці є перехід до використання альтернативних палив, одним із яких є водень [1]. Ефективність використання водню визначається не тільки його властивостями, але і технічним рівнем його системи зберігання та подачі [2]. До числа важливих характеристик таких систем належить рівень їх пожежонебезпеки, забезпечення якого здійснюється організаційними і технічними методами. Одним із таких методів є проведення контролю технічного стану систем зберігання та подачі водню, що є однією із складових системи пожежної профілактики. В зв'язку із цим однією із проблем при експлуатації водневих систем і, зокрема, систем зберігання і подачі водню, є підвищення ефективності організаційно-технічних заходів по забезпеченню їх пожежної профілактики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Небезпечна експлуатація систем зберігання та подачі водню можлива за умов забезпечення їх параметрів і характеристик, які гарантують справний стан всіх їх елементів [3]. Однією із таких характеристик є рівень пожежонебезпеки, оцінка якого здійснюється із використанням ймовірності безвідмовної роботи елементів системи зберігання та подачі водню, які унеможливлюють виникнення пожежі. Основним елементом таких систем є газогенератор [1]. В роботі [4] вказується, що для забезпечення заданого рівня ймовірності безвідмовної роботи таких елементів використовується контроль їх технічного стану. Найбільш поширеними параметрами, що контролюються в процесі роботи газогенераторів, є температура [5] та концентрація водню [6]. В роботі [7] обґрунтовані методи контролю газогенераторів систем зберігання та подачі водню, в основі яких лежить використання тест-сигналів у вигляді лінійно-зростаючої функції або у вигляді прямокутного імпульсу. Інформаційними параметрами в обох випадках є величина тиску в порожнині газогенератора. Алгоритми контролю газогенераторів реалізуються в часовій області. Як правило, алгоритми контролю систем зберігання та подачі водню є простими і передбачають контроль одного або двох параметрів процесу генерації [8]. В останній час з'явились

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

роботи, в яких розглядаються частотні методи контролю технічного стану систем зберігання та подачі водню і їх основного елемента – газогенератора [9]. В зв'язку з цим доцільним є узагальнення відомих результатів по контролю газогенераторів систем зберігання та подачі водню в частотній області.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є узагальнення методів контролю газогенераторів систем зберігання і подачі водню, в основі яких лежить використання його фазово-частотної характеристики.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити методи контролю газогенераторів із використанням його фазово-частотної характеристики за умови, коли передаточна функція газогенератора має спрощений опис;
- визначити методи контролю газогенераторів із використанням його фазово-частотної характеристики, коли передаточна функція газогенератора описується дробово-раціональною функцією другого порядку.

Виклад основного матеріалу

Всі частотні методи контролю газогенераторів системи зберігання та подачі водню можна розділити на:

- фазові;
- амплітудні;
- амплітудно-фазові.

Такий розподіл здійснюється в залежності від того, яка частотна характеристика газогенератора використовується для одержання первинної інформації.

Розглянемо фазові методи контролю газогенераторів.

В першому наближенні фазово-частотна характеристика (ФЧХ) газогенератора описується виразом

$$\varphi(\omega) = -\mathrm{arctg}\,\omega\tau, \qquad (1)$$

де τ – постійна часу газогенератора; ω – кругова частота.

При $\omega = \omega_0 = \tau^{-1}$ має місце

$$\varphi(\omega_0) = -\frac{\pi}{4}. \qquad (2)$$

В якості критерію при контролі технічного стану газогенератора використовується вираз [4]

$$\left|\varphi(\omega_0) + \frac{\pi}{4}\right| \le \varepsilon, \qquad (3)$$

де ε – мале апріорі задане число.

Алгоритм контролю в цьому випадку зводиться до вимірювання значення ФЧХ газогенератора на частоті $\omega_0 = \tau^{-1}$ та використанню критерію (3).

Особливістю такого методу контролю є те, що визначення величини $\varphi(\omega_0)$ необхідно здійснювати на фіксованій частоті $\omega = \omega_0$.

Такого обмеження можна позбутися, якщо врахувати, що [11]

$$\begin{aligned} W^{-1}(j\omega) &= A^{-1}(\omega)\exp[-j\varphi(\omega)] = \\ &= A^{-1}(\omega)[\cos\varphi(\omega) - j\sin\varphi(\omega)] = K^{-1}(1 + j\omega\tau), \end{aligned} \qquad (4)$$

де $W(j\omega)$ – амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) газогенератора; $A(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) газогенератора; K – коефіцієнт передачі газогенератора; j – уявна одиниця.

Із (4) витікає система алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} K^{-1} &= A^{-1}(\omega)\cos\varphi(\omega); \\ \omega\tau K^{-1} &= -A^{-1}(\omega)\sin\varphi(\omega), \end{aligned} \qquad (5)$$

розв'язання якої відносно τ має вигляд

$$\tau = \omega^{-1}\mathrm{tg}\varphi(\omega). \qquad (6)$$

За умови, що τ_0 – нормативне значення постійної часу газогенератора, в якості критерію технічного стану газогенератора може використовуватись вираз

$$|\tau_0 - \tau| \le \varepsilon. \qquad (7)$$

Алгоритм контролю в цьому випадку полягає в вимірюванні величини $\varphi(\omega)$ на частоті, величина якої належить діапазону робочих частот газогенератора, і використанню критерію (7) спільно із виразом (6).

Слід зазначити, що розглянуті методи контролю технічного стану газогенератора орієнтовані на використання моделі газогенератора, яка описується передаточною функцією інерційної ланки із параметрами K та τ.

В ряді випадків виникає необхідність у використанні більш точного математичного опису

процесів, які мають місце в газогенераторах систем зберігання та подачі водню. Це стосується, наприклад, бортових енергетичних систем, до складу яких входять генератори водню [1]. В цих випадках передаточна функція газогенератора системи зберігання та подачі водню описується наступним чином

$$W(p) = K(1-\tau_1 p)[(\tau_2 p+1)(\tau_3 p+1)]^{-1}, \qquad (8)$$

де τ_i, $i=\overline{1,3}$ – постійні часу; p – комплексна змінна.

Внаслідок того, що АФЧХ газогенератора може бути представлена у вигляді

$$W(j\omega) = W(p)\big|_{p=j\omega} = M(\omega) + jN(\omega), \qquad (9)$$

$$\text{де } M(\omega) = K\left[1-\omega^2(\tau_1\tau_2+\tau_1\tau_3+\tau_2\tau_3)\right]\times \\ \times\left[1+\omega^2\left(\tau_1{}^2+\tau_3{}^2+\omega^2\tau_2{}^2\tau_3{}^2\right)\right]^{-1}; \qquad (10)$$

$$N(\omega) = -K\left[\omega^2\left(\sum_{i=1}^{3}\tau_i - \omega^2\prod_{i=1}^{3}\tau_1\right)\right]\times \\ \times\left[1+\omega^2\left(\tau_2{}^2+\tau_3{}^2+\omega^2\tau_2{}^2\tau_3{}^2\right)\right]^{-1}, \qquad (11)$$

то вираз для ФЧХ газогенератора буде мати наступний вигляд

$$\varphi(\omega) = \mathrm{arctg}\left[N(\omega)[M(\omega)]^{-1}\right]. \qquad (12)$$

Якщо апріорі задані n – значень частоти ω_i, а також відповідні їм значення ФЧХ газогенератора φ_i, то в якості критерію для визначення його технічного стану використовується вираз (12)

$$|\varphi(\omega_i) - \varphi_i| \le \varepsilon,\ i=\overline{1,n}. \qquad (13)$$

Алгоритм контролю технічного стану полягає в наступному:

- задають величини ω_i, φ_i, та $\varepsilon\left(i=\overline{1,n}\right)$;
- вимірюють значення $\varphi(\omega_i)$;
- порівнюють $\varphi(\omega_i)$ та φ_i (згідно (13));
- приймають рішення.

Вибір величини ω_i здійснюється при виконанні умов [84]

$$\varphi_i = -\frac{i\pi}{4},\ i=\overline{1,n}, \qquad (14)$$

яким відповіває система співвідношень

$$\begin{aligned} M(\omega_1) &= -N(\omega_1); \\ M(\omega_2) &= 0; \\ M(\omega_3) &= N(\omega_3); \\ M(\omega_4) &= 0; \\ -M(\omega_5) &= N(\omega_5). \end{aligned} \qquad (15)$$

Цим співвідношенням із врахуванням (10) та (11) буде відповідати система алгебраїчних рівнянь відносно частот ω_i, яка має вигляд

$$i=1;5,\ \omega_i^3\prod_{i=1}^{3}\tau_i - \omega_i{}^2(\tau_1\tau_2+\tau_1\tau_3+\tau_2\tau_3) - \\ -\omega_i\sum_{i=1}^{3}\tau_i + 1 = 0; \qquad (16)$$

$$i=2,\ \omega_2{}^2(\tau_1\tau_2+\tau_1\tau_3+\tau_2\tau_3) - 1 = 0; \qquad (17)$$

$$i=3,\ \omega_3{}^3\prod_{i=1}^{3}\tau_i - \omega_3{}^2(\tau_1\tau_2+\tau_1\tau_3+\tau_2\tau_3) + \\ +\omega_3\sum_{i=1}^{3}\tau_i - 1 = 0; \qquad (18)$$

$$i=4,\ \omega_4{}^2\prod_{i=1}^{3}\tau_i - \sum_{i=1}^{3}\tau_i = 0. \qquad (19)$$

Внаслідок того, що $\omega_1 < \omega_5$, то частоті ω_1 буде відповідати менший додатний корінь алгебраїчного рівняння (16), а частоті ω_5 – більший додатний корінь цього рівняння.

Особливістю такого методу контролю є те, що вимірювання значень ФЧХ газогенератора здійснюється на п'яти частотах, які перекривають широкий діапазон. Це дозволяє суттєво підвищити достовірність результату контролю технічного стану газогенератора.

Слід відмітити, що величини постійних часу τ_i газогенератора мають порядок $0{,}01\,c$. Тоді, якщо припустити, що має місце

$$\omega\tau_i < 1{,}0, \qquad (20)$$

то можна записати

$$\mathrm{arctg}\,\omega\tau_i = \omega\tau_i,\ i=\overline{1,3}, \qquad (21)$$

внаслідок чого ФЧХ газогенератора буде мати наступний вираз

$$\varphi(\omega) = -\omega \sum_{i=1}^{3} \tau_i . \qquad (22)$$

В якості критеріїв, які використовуються для визначення результату контролю газогенератора, доцільно мати вирази

$$\left| \varphi(\omega_k) + \omega_k \sum_{i=1}^{3} \tau_{0i} \right| \le \varepsilon, \qquad (23)$$

де $\omega_k, k = \overline{i,n}$ – к-та частота, величина якої визначається згідно (20) наступним чином

$$\omega_k < \tau_{0i}^{-1}; \qquad (24)$$

τ_{0i} – нормативне значення і-ої постійної часу газогенератора.

При виборі методу контролю газогенератора в першу чергу слід надати перевагу другому із розглянутих методів. Це обумовлено тим, що при його реалізації не накладаються обмеження на вибір частот, на яких здійснюється вимірювання значень ФЧХ газогенератора. В якості іншого варіанта методу контролю може бути використаний третій із розглянутих методів. Позитивом цього методу контролю є те, що він передбачає пряме використання результатів вимірювання значень ФЧХ газогенератора.

Висновки

Показано, що при використанні в якості передаточної функції газогенератора систем зберігання та подачі водню передаточної функції інерційної ланки алгоритми контролю його технічного стану можуть бути реалізовані як із безпосереднім використанням фазово-частотної характеристики газогенератора, так і із використанням його постійної часу.

Відмічається, що при використанні математичної моделі газогенератора систем зберігання та подачі водню у вигляді дробово-раціональної функції другого порядку алгоритми контролю його технічного стану передбачають безпосереднє використання фазово-частотної характеристики газогенератора.

Показано, що всі розглянуті методи контролю технічного стану газогенератора систем зберігання та подачі водню орієнтовані на використання допускових критеріїв.

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, 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. – 32, Issue 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. – Issue 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. – 45(15). – PP. 9260–9267. DOI: http://dx.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 Enterprisse Technologies, Industry Control Systems. – 2017. – 5(8–89). – PP. 16–21. DOI: https://dx.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. – 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. *Спосіб контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню : Пат. 119845 Україна: МПК G01 L23/00 / Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201704032; заяв. 24.04.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19.*
11. *Спосіб визначення динамічних характеристик газогенератора системи зберігання та подачі водню : Пат. 117854 Україна: МПК G018 B3/06 / Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201700946; заяв. 02.02.17; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13.*
12. *Абрамов Ю.А. К определению технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2017. – Вип. 26. – С. 3–9.*

References

1. Abramov, Y.O., Krivtsova, V.I., Solovey, V.V. (2002). *Hydrogen storage and supply systems based on solids for onboard power plants*. Kharkov. [in Russian]

2. Krivtsova, V.I., Olejnikov, A.M., Yakovlev, A.P. (2007). *Inexhaustible energy. Book 4. Wind power engineering*. Nat. aerospace University "KhAI", Kharkov. [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*, 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: http://dx.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 Enterprises Technologies, Industry Control Systems*, 5(8–89), 16–21. DOI: https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112200
7. 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. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-284-289
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. *Method of monitoring the technical condition of the gas generator of the hydrogen storage and supply system* : Pat. 119845 Ukraine: IPC G01 L23 / 00 / Abramov Y.O., Borisenko, V.G., Kryvtsova, V.I., applications. and patent owner National University of Civil Defense of Ukraine. No 201704032; application. 04/24/17; publ. 10/10/17, Bull. No 19. [in Ukrainian]
11. Method of determining the dynamic characteristics of the gas generator of the storage and supply system of hydrogen : Pat. 117854 Ukraine: IPC G018 B3 / 06 / Abramov Y.O., Borisenko V.G., Kryvtsova V.I., applications. and patent owner National University of Civil Defense of Ukraine. No 201700946; application. 02.02.17; publ. 10.07.17, Bull. No 13. [in Ukrainian]
12. Abramov, Yu.A., Kryvtsova, V.I. (2017). To determine the technical condition of the gas generator of the hydrogen storage and supply system. *Problems of emergencies*, 26, 3–9. [in Russian]

Рецензент: д. т. н., професор, начальник кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій Р.І. Шевченко, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

Автор: АБРАМОВ Юрій Олексійович
доктор технічних наук, професор, г. н. с. 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 каф. 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, с. н. с., начальник докторантури, ад`юнктури
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – mihayluk.nuczu@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4116-164X

PHASE METHODS OF GAS GENERATORS CONTROL HYDROGEN STORAGE AND SUPPLY SYSTEMS

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

Methods of control of technical condition of gas generators of systems of storage and supply of hydrogen based on use of their phase-frequency characteristics are considered. Methods of control of gas generators are divided into two groups depending on the mathematical models used to describe the operation of such gas generators. It is shown that when using as such a mathematical model the transfer function of the gas generator in the form of an inertial link, it is possible to implement control algorithms both by its phase-frequency characteristics and by its time constant. In the first case, the phase-frequency characteristic is measured at an a priori set frequency. In the second case, there is no such restriction. When using as a mathematical model of the gas generator the transfer function in the form of a fractional-rational function of the second order, the implementation of algorithms for its control can be carried out directly using the phase-frequency characteristics of the gas generator. With this implementation of algorithms for monitoring the technical condition of gas generators, the measurement of the values of their phase-frequency characteristics is carried out at several frequencies. This approach to the control of gas generators can increase the reliability of its results. All methods of monitoring the technical condition of gas generators of hydrogen storage and supply systems are focused on the use of tolerance criteria. The parameters of the tolerance criteria can be both the values of the time constants of gas generators of hydrogen storage and supply systems, and fixed values of the phase-frequency characteristics of such gas generators. In the latter case, control algorithms are implemented that cover the entire operating frequency range of gas generators.

Keywords: *gas generator, hydrogen storage and supply system, control, phase-frequency characteristic.*