

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

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

АЛГОРИТМ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОГЕНЕРАТОРІВ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАЧІ ВОДНЮ В КОНТЕКСТІ ЇХ ПОЖЕЖНОЇ ПРОФІЛАКТИКИ

Розроблені алгоритми контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню, які є елементом системи їх пожежної профілактики. Алгоритми орієнтовані на визначення динамічних параметрів газогенератора і передбачають використання тест-сигналів двох типів – у вигляді лінійно зростаючої функції або у вигляді прямокутного імпульсу. Інформаційними параметрами є величини тиску в порожнині газогенератора, які вимірюються в апіорі задані моменти часу. Показано, що пріоритет при виборі алгоритму контролю газогенератора слід віддати алгоритму, в основі якого лежить використання тест-сигналу у вигляді прямокутного імпульсу зміни площі вихідного отвору газогенератора.

Ключові слова: газогенератор, алгоритм контролю, пожежна профілактика, тест-сигнал, тиск в порожнині газогенератора.

Актуальність проблеми

У теперішній час паливно-енергетичні та екологічні проблеми є найбільш актуальними і глобальними. Вони пов'язані із нестачею та подорожчанням енергетичних ресурсів, зростаюча потреба в яких задовольняється в основному за рахунок копалинних палив. Різке скорочення природних ресурсів за умови їхнього мало-ефективного використання та погіршення якості навколишнього середовища є важливими складовими сучасної паливно-екологічної кризи.

Одним із перспективних напрямків, здатних якісно змінити сучасну ситуацію у світовій енергетиці, є перехід до альтернативних палив, одним із яких є водень. Ефективність використання водню визначається не тільки його фізико-хімічними властивостями, але і технічним рівнем його системи зберігання та подачі [1]. Однією із важливих характеристик таких систем є рівень їх пожежонебезпеки, забезпечення якого здійснюється як організаційними, так і технічними методами.

Забезпечення апіорі заданого рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню залежить від ефективності системи пожежної профілактики. В зв'язку з цим однією із проблем при експлуатації водневих систем є підвищення ефективності організаційно-технічних заходів по забезпеченню їх пожежної профілактики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи оцінки рівня пожежонебезпеки систем зберігання та подачі водню та їх основних елементів наведені в роботі [2]. В цій же роботі наведений

алгоритм синтезу таких систем за критерієм мінімуму маси при умові, що вірогідність безвідмовної роботи елементів (пристроїв), які унеможливають виникнення пожежі, не перевищують апіорі заданої величини. В роботі [3] звертається увага на те, що для забезпечення небезпечної експлуатації систем із використанням водню, повинні бути забезпечені такі параметри та характеристики, які гарантують справний стан всіх їх елементів.

Основним елементом системи зберігання та подачі водню є газогенератор. Гарантоване забезпечення технічних характеристик цього елемента може бути здійснено шляхом реалізації відповідних алгоритмів контролю його технічного стану [4]. В [5] наведена методологія одержання оцінки ефективності генератора водню, який включає електролізер води. Для цього використовуються термодинамічні та економічні характеристики установки «Електрогаз», які були визначені в залежності від кількості виробленої енергії. Слід зазначити, що ці характеристики не можуть бути використані для визначення технічного стану генератора водню. Для опису процесів генерації водню в гідридних системах найчастіше використовують ізотермічні діаграми [6], але при формуванні алгоритмів контролю таких систем не враховуються їх динамічні властивості. Найбільш поширеними параметрами генераторів водню, що контролюються, є температура [4] та концентрація водню [2]. Слід зазначити, що, як правило, алгоритми контролю систем зберігання та подачі водню є тривіальними [7] і передбачають контроль одного-двох параметрів технологічного процесу генерації

водню. В роботі [8] запропонований алгоритм контролю технічного стану генератора водню на основі гідрореагуючих складів, який передбачає використання амплітудно-частотної характеристики такого генератора. При реалізації такого алгоритму контролю використовується лише одне значення частотної характеристики генератора на апriorі заданій частоті, що унеможливило одержання інформації стосовно технічного стану генератора на інших частотах робочого діапазону. В зв'язку з цим доцільним є розробка алгоритмів контролю газогенератора систем зберігання та подачі водню в часовій області.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка алгоритмів контролю газогенератора систем зберігання та подачі водню в часовій області.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати створення алгоритмів контролю газогенератора при використанні тест-сигналу у вигляді лінійно зростаючої функції;
- обґрунтувати створення алгоритмів контролю газогенератора при використанні тест-сигналу у вигляді прямокутного імпульсу;
- визначити пріоритети стосовно використання розроблених алгоритмів контролю газогенератора.

Алгоритм контролю газогенератора, їх особливості та пріоритети

Для реалізації алгоритмів контролю газогенератора системи зберігання та подачі водню в часовій області можуть використовуватись в якості тест-сигналів сигнали, які описуються виразами

$$F(t) = F_0 + bt ; \tag{1}$$

$$F(t) = F_0 [1(t) - 1(t - t_0)] , \tag{2}$$

де F_0, b, t_0 – задані параметри; $1(\cdot)$ – функція Хевісайда; $F(t)$ – площа вихідного отвору газогенератора.

В режимі, що встановився, тиск в порожнині газогенератора буде описуватись виразом

$$P(t) = P_0 + Kb(t - \tau) , \tag{3}$$

де $P_0 = \text{const}$; K, τ – коефіцієнт передачі та постійна часу газогенератора відповідно.

Для моментів часу t_1 та t_2 із (3) витікає, що

$$P_1(t) = P_0 + Kb(t_1 - \tau) ; \tag{4}$$

$$P_2(t) = P_0 + Kb(t_2 - \tau) , \tag{5}$$

внаслідок чого для параметрів K та τ буде мати місце

$$K = (P_2 - P_1) [b(t_2 - t_1)]^{-1} ; \tag{6}$$

$$\tau = (\alpha - 1)^{-1} (\alpha t_1 - t_2) , \tag{7}$$

де

$$\alpha = (P_2 - P_0)(P_1 - P_0)^{-1} . \tag{8}$$

Реалізація алгоритму контролю газогенератора в цьому випадку зводиться до визначення параметрів K та τ при апriorі заданих значеннях P_0, b, t_1 та t_2 . З цієї метою алгоритм контролю передбачає вимірювання величин P_1 та P_2 , а результат контролю визначається у відповідності із критеріями [9]

$$|K - K_0| \leq \varepsilon_1 ; \tag{9}$$

$$|\tau - \tau_0| \leq \varepsilon_2 , \tag{10}$$

де K_0, τ_0 – нормативні величини коефіцієнта передачі та постійної часу газогенератора відповідно; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – апriorі задані малі числа.

Можливий інший підхід. Так, для інтервалу $t_1 - t_2$ можна записати

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} (A + at) dt , \tag{11}$$

де

$$A = P_0 - Kb\tau ; a = Kb . \tag{12}$$

Якщо врахувати (4), (5) та (12), то буде мати місце

$$0,5(P_1 + P_2) = A + 0,5a(t_1 + t_2) , \tag{13}$$

а згідно (11) можна записати співвідношення

$$(t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = (t_2 - t_1)^{-1} \times \tag{14}$$

$$\times \int_{t_1}^{t_2} (A + at) dt = A + 0,5a(t_1 + t_2) .$$

Контроль газогенератора в цьому випадку зводиться до перевірки умови [10]

$$\left| 0,5(P_1 + P_2) - (t_2 + t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \right| \leq \varepsilon, \quad (15)$$

де ε – апріорі задане мале число.

Із порівняння розглянутих підходів до контролю газогенератора витікає, що в першому випадку реалізується прямий метод, а в другому випадку – непрямий метод контролю. Перевагою першого методу контролю є те, що при його реалізації визначаються безпосередні величини параметрів газогенератора. Крім того, в першому випадку відпадає необхідність в вимірюванні додаткової величини – середнього значення тиску в порожнині газогенератора на інтервалі часу $t_2 - t_1$.

Якщо в якості тест-сигналу використовується сигнал, що має опис (2), то за умови, що

$$\tau \ll t_0, \quad (16)$$

а $F(t)$ та $P(t)$ пов'язані через диференціальне рівняння виду

$$\tau \frac{dP(t)}{dt} + P(t) = KF(t), \quad (17)$$

в режимі, що встановився, буде мати місце

$$\int_0^{2t_0} P(t) dt = K \int_0^{2t_0} F(t) dt = RF_0 t_0, \quad (18)$$

Із (18) витікає, що

$$K = (F_0 t_0)^{-1} \int_0^{2t_0} P(t) dt, \quad (19)$$

внаслідок чого результат контролю газогенератора може визначатись за допомогою критерію [11]

$$\left| (F_0 t_0)^{-1} \int_0^{2t_0} P(t) dt - K_0 \right| \leq \varepsilon, \quad (20)$$

де K_0 – нормативна величина коефіцієнта передачі газогенератора; ε – апріорі задане мале число.

Реалізація алгоритму контролю газогенератора в цьому випадку зводиться до визначення (вимірювання) величини середнього значення тиску

в порожнині газогенератора на інтервалі часу, який дорівнює подвійній тривалості імпульсу тест-сигналу.

Розглянемо інший варіант організації контролю газогенератора із використанням тест-сигналу, що має опис у вигляді (2). В цьому випадку тиск в порожнині газогенератора буде описуватись виразом

$$P(t) = L^{-1}[W(p)F(p)], \quad (21)$$

де L^{-1} – оператор зворотного зображення Лапласа; $W(p)$ – передаточна функція газогенератора; $F(p)$ – зображення по Лапласу від функції (2); p – комплексне число.

Із (17) витікає, що

$$W(p) = K(\tau p + 1)^{-1}, \quad (22)$$

а із (2) витікає, що

$$F(p) = F_0 p^{-1} [1 - \exp(-pt_0)], \quad (23)$$

внаслідок чого для $P(t)$ згідно (21) має місце

$$P(t) = KF_0 \begin{bmatrix} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] I(t) - \\ - \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right] I(t-t_0) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

В момент часу t_1 , який не перевищує величини $0,5\tau$ [12], величина тиску в порожнині газогенератора дорівнює

$$P(t_1) = KF_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \right] = P_1. \quad (25)$$

В момент часу $t_2 = t_1 + t_0$ величина тиску в порожнині газогенератора дорівнює

$$\begin{aligned} P(t_2) &= KF_0 \exp\left(-\frac{t_2 - t_0}{\tau}\right) = \\ &= KF_0 \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) = P_1. \end{aligned} \quad (26)$$

Із (25) та (26) витікає, що

$$K = (P_1 + P_2) F_0^{-1}, \quad (27)$$

а згідно (25) та (27) для параметра τ можна записати вираз

$$\begin{aligned} \tau &= -t_1 \ln \left[1 - P_1 (K F_0)^{-1} \right] = \\ &= -t_1 \left[\ln \left[P_2 (P_1 + P_2)^{-1} \right] \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (28)$$

Результат контролю газогенератора в цьому випадку буде визначатись за допомогою критеріїв

$$\left| (P_1 + P_2) F_0^{-1} - K_0 \right| \leq \varepsilon_1, \quad (29)$$

$$\left| t_1 \left[\ln \left[P_2 (P_1 + P_2)^{-1} \right] \right]^{-1} + \tau_0 \right| \leq \varepsilon_2. \quad (30)$$

Процес контролю в цьому випадку зводиться до вимірювання величин P_1 та P_2 в задані моменти часу. Слід зазначити, що при такій реалізації алгоритму контролю газогенератора визначаються величини його параметрів K та τ , що відсутні в попередньому алгоритмі.

Якщо порівняти прямі методи контролю, що оснований на використанні тест-сигналів (1) та (2), то слід зазначити, що в другому випадку часові витрати на реалізацію алгоритму контролю газогенератора будуть меншими.

Із аналізу особливостей розроблених алгоритмів контролю технічного стану газогенераторів систем зберігання та подачі водню витікає, що перевагу при їх виборі слід надати, в першу чергу, алгоритмам, в яких реалізовані прямі методи контролю. Ці алгоритми передбачають визначення таких параметрів газогенератора, як коефіцієнт передачі та постійна часу. По мінімуму кількості апріорі фіксованих параметрів та по мінімуму часових витрат найвищий пріоритет слід надати алгоритму контролю, в основі якого лежить використання тест-сигналу, опис якого має вигляд (2), а величини, які вимірюються, є тиск P_1 – вираз (25) та тиск P_2 – вираз (26).

Висновки

Стосовно до газогенератора системи зберігання та подачі водню обґрунтовані можливості створення алгоритмів контролю їх технічного стану, в основі яких лежить використання тест-сигналів двох видів:

- лінійно зростаючої функції;
- прямокутного імпульсу.

Контроль технічного стану газогенераторів є елементом системи їх пожежної профілактики і передбачає реалізацію прямих і непрямих методів. В першому випадку для апріорі заданих параметрів здійснюється вимірювання двох значень тиску в порожнині газогенератора. В другому випадку

визначається середнє значення тиску в порожнині газогенератора на фіксованому інтервалі часу.

При виборі алгоритму контролю газогенератора перевагу слід надати алгоритму, в якому використовується в якості тест-сигналу зміна площі вихідного отвору газогенератора у вигляді прямокутного імпульсу, а також реалізується прямий метод контролю.

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. Абрамов Ю.О., Кривцова В.И., Соловей В.В. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / – X.: 2002. – 277 с. – ISBN–966–03–1094–3.
3. Sorensen B. Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development // *Int. J. Energy Res.* 2008.32. Inssue 5: 367–368.
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. Kotowicz J, Bartela L., Wecel D., Dubiel K. Hydrogen generator characteristics for storage of renewably-generated energy // *Energy*. 2017. Inssue 118: 156–171.
6. Goltsova M.V., Artemenko Y.A., Zhirov G.I. Hidride transformations: nature, kinetics, morphology // *Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology*. 2014. Inssue 1: 70–84.
7. 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.
8. 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.
9. Спосіб визначення постійної часу газогенератора системи зберігання та подачі водню: Пат. 137080 Україна: МПК G01B 3/06, G01F 1/34/Абрамов Ю.О., Кривцова В.І., Михайлюк А.О., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201904253; заяв. 22.04.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18.
10. Спосіб контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню: Пат. 119107 Україна: МПК G01 L23/00 / Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №201703308; заяв. 06.04.17; опубл. 11.09.17, Бюл. № 17.
11. Спосіб контролю газогенераторів системи зберігання та подачі водню: Пат. 143087 Україна: МПК G01L 23/00, B01J 7/00/ Абрамов Ю.О., Кривцова В.І., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №202000544; заяв. 29.01.2020; опубл. 10.07.2020, Бюл. № 13.
12. Спосіб контролю газогенераторів системи зберігання та подачі водню: Пат. 146146 Україна: МПК

G01L 23/00, B01J 7/00/ *Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І., Михайлюк А.О., заяв. та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – №202005822; заяв.10.09.2020; опубл. 20.01.2021, Бюл. №3.*

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. Abramov Yu.O., Krivtsova V.I., Solovey V.V. Solid-based hydrogen storage and delivery systems for onboard power plants / – Kh.: 2002. – 277 с. – ISBN–966–03–1094–3.
3. Sorensen B. Renewables and hydrogen energy technologies for sustainable development // Int. J. Energy Res.2008.32. Inssue 5: 367–368.
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. Kotowicz J. Bartela L., Wecel D., Dubiel K. Hydrogen generator characteristics for storage of renewably-generated energy // Energy.2017. Inssue 118: 156–171.
6. Goltsova M.V., Artemenko Y.A., Zhiron G.I. Hidride transformations: nature, kinetics, morphology // Int. Scientific J. for Alternative Energy and Ecology. 2014. Inssue 1: 70–84.
7. 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.
8. 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 Enterprisise Technologies, Industry Control Systems, 2017, 5 (8-89), p. 16-21. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112200.
9. Method value of time constant of gas generator of hydrogen storage and supply system: US Pat. 137080 Ukraine: IPC G01B 3/06, G01F 1/34 / Abramov Y., Krivtsova V., Mikhailyuk A., statements. and patent owner National University of Civil Defense of Ukraine. - №201904253; application. 04/22/2019; publ. 25.09.2019, Bull. № 18.
10. Method of monitoring technical condition of gas generator of hydrogen storage and supply system: US Pat. 119107 Ukraine: IPC G01 L23 / 00 / Abramov Y., Borisenko V., Kryvtsova V., applications. and patent owner National University of Civil Defense of Ukraine. – №201703308; application. 06.04.17; publ. 11.09.17, Bull. № 17.
11. Method of control of gas generators of hydrogen storage and supply system: US Pat. 143087 Ukraine: IPC G01L 23/00, B01J 7/00 / Abramov Y., Kryvtsova V., application. and patent owner National University of Civil Defense of Ukraine. - №202000544; application. 01/29/2020; publ. 10.07.2020, Bull. № 13.
12. Method of control of gas generators of hydrogen storage and supply system: US Pat. 146146 Ukraine: IPC G01L 23/00, B01J 7/00 / Abramov Y., Borisenko V., Kryvtsova V., Mikhailyuk A., application. and patent owner National University of Civil Defense of Ukraine. – №202005822; application 10.09.2020; publ. 20.01.2021, Bull. № 3.

Рецензент: д. т. н., старший науковий співробітник, начальник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру Р.І.Шевченко, Національний університет цивільного захисту України, Харків, 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
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: basmanov@ukr.net
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
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4116-164X>

TECHNICAL CONDITION CONTROL ALGORITHM GAS GENERATORS OF STORAGE SYSTEMS AND HYDROGEN SUPPLY IN THE CONTEXT OF THEIR FIRE PREVENTION

Y. Abramov, V. Kryvtsova, A. Mikhailyuk

National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Algorithms for the control of the technical mill of gas generators in the systems of protection and supply of water, as an element of the systems of fire prevention. Algorithms for monitoring the dynamic parameters of gas generators of gas generators to control the flow and transmitting test signals to two types - from the viewer of the linearly growing function, or from the viewer of the straightforward view. One hundred percent before such test signals are broken down direct and indirect methods of control of the technical mill of gas generators in the systems

of recovery and supply of water. It is shown that in the implementation of direct methods of control, no middle value of the parameters in the gas generators begins.

To such parameters, the transmission efficiency is applied and continuously for an hour, as they characterize the dynamic power of gas generators in the systems of securing and supplying water. When implementing indirect methods of control, the integral characteristics of gas generators begin. In the quality of the information parameters, which are used to formulate the control algorithms, vibrating the vice in the empty gas generator of any average value. The values of these parameters are changed at two april given time of the hour, or at april given interval hour. In the quality of the criteria for the result of the control of the technical mill of the gas generators, the tolerance criteria are determined. It is shown that the priority in the vibration of the algorithm for the control of the technical mill of gas generators in the systems of gas generators and the supply of gas generators to the algorithm, which is based on the test signal in the form of a straight-flow gas generator. It should be considered that, when implementing such an algorithm, the control of the technical mill of gas generators in the systems of ensuring that the supply of vitality is kept to a minimum is minimal.

Keywords: gas generator, control algorithm, fire prevention, test signal, pressure in gas generator cavity.