

*А. А. Михайлюк, к.т.н., с.н.с., нач. адъюнктуры, докторантуры, НУГЗУ,
В. И. Кривцова, д.т.н., профессор, профессор каф., НУГЗУ,
Ю. А. Абрамов, д.т.н., профессор, главн. н.с., НУГЗУ*

АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРОФИЛАКТИКИ ЕГО ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В рамках решения задачи по профилактике пожарной безопасности газогенератора системы хранения и подачи водорода разработан алгоритм контроля его технического состояния, в основе которого лежит использование массива экспериментальных данных о переходной функции газогенератора.

Ключевые слова: газогенератор, техническое состояние, переходная функция, частотные характеристики.

Постановка проблемы. Одним из направлений по совершенствованию энергетических систем является использование в качестве рабочего тела таких систем водорода [1]. Генерация водорода в этих системах осуществляется с использованием газогенераторов, которые объединены в систему хранения и подачи водорода. Одной из проблем при этом является обеспечение нормативного уровня пожарной безопасности.

Анализ последних исследований и публикаций. Методы определения уровня пожарной безопасности применительно к системам хранения и подачи водорода впервые представлены в монографии [1]. Дальнейшее развитие они получили в работе [2]. Следует отметить, что уровень пожарной безопасности таких систем в этих работах оценивается на этапе их синтеза. При этом используются методы теории надежности. На этапе эксплуатации уровень пожарной безопасности должен определяться согласно ГОСТ 12.1.004 – 91 «Пожарная безопасность. Общие требования». Однако распространение положений этого стандарта на системы хранения и подачи водорода и их элементов является проблематичным вследствие отсутствия достаточного количества статистических данных. В качестве альтернативного варианта в работах [3, 4] в качестве одной из составляющей профилактики пожарной безопасности газогенераторов систем хранения и подачи водорода используется контроль его технического состояния. В работе [5] представлен алгоритм контроля технического состояния газогенератора, реализация которого возможна лишь на одной частоте, что является недостатком такого подхода. В [6] контроль технического состояния газогенератора осуществляется на пяти априори заданных значениях частот, принадлежащих всему рабочему диапазону частот газогенератора. Однако при реализации такого алгоритма контроля критерий, по которому судят о техническом состоянии газогенератора, не учитывает все параметры динамической модели газогенератора.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является разработка алгоритма контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода, который включает необходимость использования всех параметров его динамической модели.

Динамические свойства газогенератора системы хранения и подачи водорода описываются передаточной функцией вида [7]

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

где K – коэффициент передачи; τ_i – i -я постоянная времени ($i = 1, 3$); p – комплексное число.

Такой передаточной функции будут соответствовать амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ и фазово-частотная характеристика $\varphi(\omega)$ газогенератора [8]

$$A(\omega) = K \left[\left[1 + (\omega\tau_1)^2 \right] \left[1 + (\omega\tau_2)^2 \right] \left[1 + (\omega\tau_3)^2 \right] \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = - \sum_{i=1}^3 \arctg \omega\tau_i, \quad (3)$$

где ω – круговая частота.

В том случае, когда генерация водорода осуществляется с использованием гидроуреагирующих составов, величина постоянных времени τ_i не превышает 0,01с [2]. Тогда, полагая, что имеет место

$$(\omega\tau_i)^2 < 1,0, \quad (4)$$

можно записать следующие соотношения [2]

$$\left[1 + (\omega\tau_i)^2 \right]^{-1} = 1 - (\omega\tau_i)^2, \quad i = 2, 3; \quad (5)$$

$$\arctg \omega\tau_i = \omega\tau_i, \quad i = 1, 3. \quad (6)$$

с учетом которых выражения (2) и (3) будут трансформироваться к виду

$$A(\omega) = K \left[\left[1 + (\omega\tau_1)^2 \right] \left[1 - (\omega\tau_1)^2 \right] \left[1 - (\omega\tau_1)^2 \right] \right]^{-1}, \quad (7)$$

$$\varphi(\omega) = - \sum_{i=1}^3 \omega\tau_i, \quad (8)$$

Если в (7) учесть (4), то оно может быть переписано следующим образом

$$A(\omega) = K \left[1 + \omega^2 (\tau_1^2 - \tau_2^2 - \tau_3^2) \right]^{0,5}, \quad (9)$$

Следует заметить, что выражения (8) и (9) получены с погрешностями, которые являются методическими. Это обусловлено использованием соотношений (5), (6), а также пренебрежением слагаемых вида $(\omega\tau_i)^4$ при переходе от выражения (7) к выражению (9).

Для выражения (8) методическая погрешность определяется соотношением

$$\delta_\varphi = \frac{(\omega\tau_i)^3}{3}, \quad (10)$$

а для выражения (9) – соотношением

$$\delta_A = 2(\omega\tau_i)^4. \quad (11)$$

На рис. 1 приведены зависимости (10) и (11) при $\tau_i = \tau_{\max} = 0,01\text{с}$

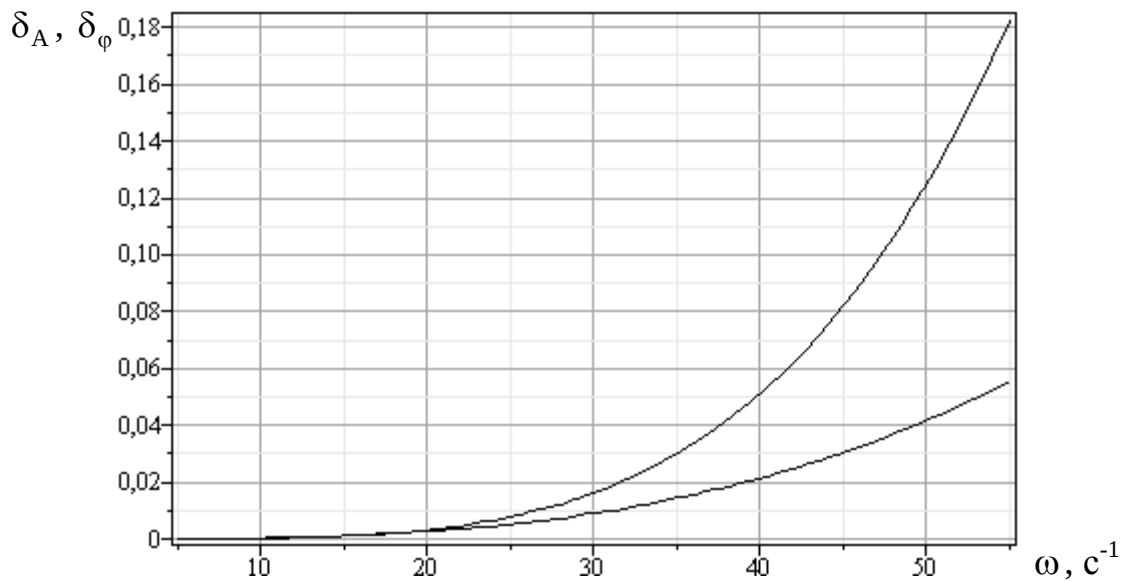


Рис. 1. Методические погрешности аппроксимации частотных характеристик газогенератора: 1 – δ_A ; 2 – δ_φ

Использование зависимостей, приведенных на рис. 1, позволяет решать прямую задачу – по заданному значению частоты ω определять погрешности δ_A и δ_φ и обратную задачу – по величине допустимой методической погрешности δ_{don} определять верхнюю границу частоты ω_0 , при которой определяются частотные характеристики газогенератора. Вследствие того, что имеет место

$$\delta_A > \delta_\varphi, \quad (12)$$

то для решения обратной задачи в качестве δ_{don} следует использовать

значение погрешности δ_A . В частности, при $\delta_{don} = 5,0\%$ и при $\tau_{\max} = 0,01\text{с}$ верхняя граница частоты ω_0 составляет $39,76\text{с}^{-1}$. Для такого значения частоты погрешность δ_φ равна $2,1\%$.

Выражения (8) и (9) могут быть использованы для формирования критериев в алгоритме контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода. В качестве таких критериев целесообразно использовать неравенства

$$\left| \varphi(\omega_0) + \omega_0 \sum_{i=1}^3 \tau_{0i} \right| \leq \varepsilon; \quad (13)$$

$$\left| A(\omega)_0 - K_0 \left[1 + \omega_0^2 (\tau_{01}^2 - \tau_{02}^2 - \tau_{03}^2) \right]^{0,5} \right| \leq \varepsilon, \quad (14)$$

где ε – априори заданное малое число; индекс “0” при i – х постоянных времени и коэффициенте передачи газогенератора свидетельствует о том, что их значения принимаются такими, которые соответствуют нормативным документам. Частота ω_0 выбирается с учетом выражения (11) при условии, что $\delta_A \leq \delta_{don}$, т.е.

$$\omega_0 \leq \tau_{\max}^{-1} (2\delta_{don})^{0,25}. \quad (15)$$

Алгоритм контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода сводится к выполнению следующих процедур:

- изменяют площадь выходного отверстия газогенератора по гармоническому закону с частотой, величина которой должна соответствовать условию (15);

- на частоте ω_0 определяют значения частотных характеристик $A(\omega_0)$ и $\varphi(\omega_0)$;

- с использованием нормативных значений параметров газогенератора K_0 и τ_{0i} проверяют выполнение условий (13) и (14).

При выполнении условий (13) и (14) техническое состояние газогенератора системы хранения и подачи водорода принимается таким, что оно соответствует требованиям нормативных документов.

Использование критериев (13) и (14) предполагает определение частотных характеристик газогенератора. Рассмотренный алгоритм ориентирован на определение частотных характеристик $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ с использованием прямого метода их определения. Такому методу присущ ряд недостатков: - сложность оборудования для проведения измерений на низких частотах; - необходимость преобразования сигналов, в частности, площади выходного отверстия газогенератора в электрический сигнал; - большое количество оборудования и др.

Более целесообразно использование в рассматриваемом случае косвенного метода определения частотных характеристик газогенератора [10]. Такой подход предусматривает определение экспериментальным путем массива данных о переходной функции газогенератора с последующим использованием вычислительной процедуры пересчета в частотную область. Переходная функция при таком подходе аппроксимируется выражением [10]

$$h(t) = \sum_{k=0}^n \Delta_k 1[t - (k + 0,5)\tau], \quad (16)$$

где τ – интервал дискретности, Δ_k – приращение давления в полости газогенератора на интервале времени $(k + 1)\tau \div k\tau$; $1(\cdot)$ – функция Хевисайда.

Применив к (16) оператор интегрального преобразования Лапласа, получим

$$H(p) = p^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta_k \exp[-p(k + 0,5)\tau]. \quad (17)$$

Тогда комплексная передаточная функция газогенератора будет определяться выражением

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= B^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta_k \exp[-j\omega(k + 0,5)\tau] = \\ &= B^{-1} \sum_{k=0}^n \Delta_k [\cos[\omega(k + 0,5)\tau] - j \sin[\omega(k + 0,5)\tau]], \end{aligned} \quad (18)$$

где B – масштаб изменения площади выходного отверстия газогенератора; j – мнимая единица. Из (18) следуют выражения для частотных характеристик $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = B^{-1} \left[\left[\sum_{k=0}^n \Delta_k \cos[\omega(k + 0,5)\tau] \right]^2 + \left[\sum_{k=0}^n \Delta_k \sin[\omega(k + 0,5)\tau] \right]^2 \right]^{0,5}; \quad (19)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = -\arctg \left[\left[\sum_{k=0}^n \Delta_k \sin[\omega(k + 0,5)\tau] \right] \times \left[\sum_{k=0}^n \Delta_k \cos[\omega(k + 0,5)\tau] \right]^{-1} \right]. \quad (20)$$

Параметр τ в этих выражениях определяется с использованием теоремы Котельникова – Найквиста – Шеннона, т. е.

$$\tau = 0,5 f_m^{-1}, \quad (21)$$

где f_m – максимальное значение частоты спектра функции $h(t)$.

При таком методе определения частотных характеристик газогенератора алгоритм контроля его технического состояния, изложенный ранее, будет отличаться лишь тем, что вместо изменения площади выходного отверстия газогенератора по гармоническому закону ее необходимо изменять скачкообразно на величину B .

Позитивом при реализации такого алгоритма контроля технического состояния газогенератора является то, что при однократном скачкообразном изменении площади выходного отверстия газогенератора обеспечивается определение его частотных характеристик во всем диапазоне рабочих частот. Наличие такой информации открывает возможность в оценке технического состояния газогенератора на любой из частот, величины которых удовлетворяют условию (18), без проведения дополнительных измерений, а только с помощью вычислительных процедур в соответствии с выражением (13) и (14).

Выводы. Разработан алгоритм контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода, который является одной из составляющих профилактики его пожарной безопасности. В основе такого алгоритма лежит определение экспериментальным путем переходной функции газогенератора, которая служит исходной информацией для реализации вычислительных процедур по формированию частотных характеристик газогенератора. Значения частотных характеристик газогенератора на априори заданной частоте, величина, которой выбирается из условия обеспечения допустимой величины методической погрешности, используются для определения технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю. А., Кривцова В. И., Соловей В. В. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок Х.: 2002. С. 273.
2. Абрамов Ю. А., Корниенко Р. В., Кривцова В. И. Пожаровзрывоопасность систем хранения и подачи водорода на основе гидрореагирующих составов Х.: АГЗУ, 2005. С. 114.
3. Абрамов Ю. О., Кривцова В. І. Технічне забезпечення пожежної профілактики системи зберігання та подачі водню. Проблеми пожарной безопасности Х.: НУГЗУ, 2019. № 45. С. 3–7.
4. Абрамов Ю. А., Кривцова В. И. К определению технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водовода. Проблеми надзвичайних ситуацій Х.: НУЦЗУ, 2017. № 26. С. 3–10.
5. Абрамов Ю. А., Борисенко В. Г., Кривцова В. И. Алгоритм контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водовода. Проблеми надзвичайних ситуацій Х.: НУЦЗУ, 2017. № 25. С. 3–7.
6. Abramov Yu., Basmanov A., Krivtsova V., Mikhayluk A. The synthesis of control algorithm over a technical condition of the hydrogen genera-

tors based on hydro-reactive compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems, 2018, 3 (2-93). P. 54–60. doi: 10.25587/1729-4061.2018.131020.

7. Абрамов Ю. А., Кривцова В. И., Фуников А. С Мониторинг технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ, 2016. №24. С. 3–8.

8. Abramov Yu, Borisenko V., Krivtsova V. Design of control algorithm over technical condition of hydrogen generators based on hydro-reactive compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems, 2017, 5 (8-89). P. 16–21.

9. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1966. С. 228.

10. Abramov Yu, Basmanov A., Krivtsova V., Mikhayluk A., Mikhayluk O. Determining the source data to form a control algorithm for hydrogen generators / Yu Abramov, // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Industry Control Systems, 2019, 5 (9-101). P. 58-64. doi: 10.15587/1729-4061.2019.181417.

Получено редколлегией 05.01.2020

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

Алгоритм контролю технічного стану газогенератора як складової профілактики його пожежної небезпеки

В рамках рішення задачі по профілактиці пожежної небезпеки газогенератора системи зберігання та подачі водню розроблено алгоритм контролю його технічного стану, в основі якого лежить використання масиву експериментальних даних стосовно перехідної функції газогенератора.

Ключові слова: газогенератор, технічний стан, перехідна функція, частотні характеристики.

A. Mikhayluk, V. Krivtsova, Yu. Abramov

An algorithm for controlling the technical condition of a gas generator as a component of its fire risk prevention

In the framework of the solution of the problem of prevention of fire hazard of the gas generator of the storage and supply system of hydrogen, an algorithm of control of its technical condition was developed, based on the use of an array of experimental data regarding the transient function of the gas generator.

Keywords: gas generator, technical condition, transition function, frequency characteristics.