

Ю.А. Абрамов, д.т.н., гл. научн. сотр., НУГЗУ,  
В.Г. Борисенко, к.т.н., доцент, НУГЗУ,  
В.И. Кривцова, д.т.н., профессор, НУГЗУ

## АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОРОДА

Представлен алгоритм определения технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода, в основе которого лежит использование частотных характеристик газогенератора.

**Ключевые слова:** газогенератор, частотные характеристики, постоянная времени.

**Постановка проблемы.** Эксплуатация систем хранения и подачи водорода с использованием твердых веществ осуществляется при температуре (300 ÷ 1500) К и давлении (0,1 ÷ 52,0) МПа [1], что обуславливает необходимость в обеспечении усиленных мер безопасности. Одной из проблем при этом является получение информации о состоянии одного из основных элементов таких систем – газогенератора водорода в динамическом режиме его работы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научные основы создания систем хранения и подачи водорода на основе твердых веществ приведены в [1]. В качестве водородосодержащих смесей рассматривались составы на основе  $\text{AlH}_3 + \text{TiH}_2$ ,  $\text{AlH}_3 + \text{Ni}$ ,  $\text{LaNi}_5\text{H}_x$ ,  $\text{FeTiH}_x$ ,  $\text{NaAlH}_4$  и  $\text{NaN} + \text{Al}$ . В работе разработаны методы получения оценок пожаровзрывоопасных ситуаций в системах хранения и подачи водорода бортовых энергоустановок. В [2] представлены научные основы по оценке последствий чрезвычайных ситуаций, которые могут иметь место в таких системах. Однако до сих пор остается открытым вопрос об определении технического состояния, в частности, газогенераторов водорода таких систем в любой момент времени.

**Постановка задачи и её решение.** Целью работы является разработка алгоритма для контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода с учетом его динамических свойств.

Динамические свойства газогенераторов систем хранения и подачи водорода на основе твердых веществ в первом приближении описываются передаточной функцией, имеющей вид [1]

$$W(s) = \Delta P(s) [\Delta F(s)]^{-1} = K(\tau_0 s + 1)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\Delta P(s), \Delta F(s)$  – изображения по Лапласу от приращения давления в полости газогенератора и от приращения площади выходного отверстия газогенератора соответственно;  $K$  – коэффициент передачи;  $\tau_0$  – обобщенная постоянная времени;  $s$  – комплексное число.

Если входное воздействие на газогенератор системы хранения и подачи водорода описывается выражением

$$F(t) = F_0 + F_m \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $F_0, F_m$  – постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей площади выходного отверстия газогенератора;  $\omega$  – круговая частота, то для давления в полости газогенератора можно записать

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 + P_m \sin[\omega t + \varphi(\omega)] = \\ &= A(0)F_0 + A(\omega)F_m \sin[\omega t + \varphi(\omega)], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_0, P_m$  – постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей давления в полости газогенератора;  $A(\omega), \varphi(\omega)$  – амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики газогенератора соответственно.

Применительно к (1) выражения для  $A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  имеют вид [3]

$$A(\omega) = K(1 + \omega^2 \tau_0^2)^{-0.5}; \quad \varphi(\omega) = -\arctg \omega \tau_0. \quad (4)$$

Из (3) следует тождество

$$P_0 P_m^{-1} = F_0 A(0) [F_m A(\omega)]^{-1}, \quad (5)$$

которое в [4, 5] использовано для формирования критерия контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода. В частности, если тест-воздействие на газогенератор описывается выражением (2), то при  $\omega = \omega_0 = \tau_0^{-1}$  согласно (4) выражение (5) трансформируется к виду

$$P_0 P_m^{-1} = \sqrt{2} F_0 F_m^{-1}, \quad (6)$$

а критерий контроля технического состояния газогенератора может быть представлен в виде

$$\left| P_0 P_m^{-1} - \sqrt{2} F_0 F_m^{-1} \right| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – малое число.

Алгоритм контролю технічного стану газогенератора зводиться до вимірювання величин  $P_0$  і  $P_m$  при фіксованих значеннях  $F_0, F_m$ , а також  $\omega_0 = \tau_0^{-1}$  і  $\varepsilon$  з наступним використанням критерія (7). Параметр  $\varepsilon$  визначає розміри області, якій повинна належати фігуративна точка, центр якої визначається координатами  $\omega_0, A(\omega_0)$ .

Вихід фігуративної точки за межі цієї області свідчить про те, що технічний стан газогенератора системи зберігання та подачі водороду відрізняється від стану, яке регламентується відповідними нормативними документами (умову (7) при цьому не виконується).

Слід підкреслити, що для побудови критерія (7) використовувалась амплітудно-частотна характеристика  $A(\omega)$  (4). Використання фазово-частотної характеристики  $\varphi(\omega)$  дозволяє реалізувати інший підхід до процедури контролю технічного стану газогенератора. В частині, з (4) випливає, що при  $\omega = \omega_0 = \tau_0^{-1}$  має місце

$$\varphi(\omega_0) = -\frac{\pi}{4}. \quad (8)$$

Тоді критерій контролю технічного стану газогенератора може бути представлений у вигляді

$$\left| \varphi(\omega_0) + \frac{\pi}{4} \right| \leq \varepsilon, \quad (9)$$

а алгоритм контролю зводиться до вимірювання кута зсуву фаз між гармонічними складовими (3) і (2) на частоті  $\omega = \omega_0 = \tau_0^{-1}$  з наступною перевіркою умови (9). Параметр  $\varepsilon$  в цьому випадку визначає розміри області, якій повинна належати фігуративна точка, центр якої визначається координатами  $\omega_0, \varphi(\omega_0)$ , тобто виконання умови (9) свідчить про відповідність технічного стану газогенератора вимогам відповідних нормативних документів.

Слід відзначити, що обидва розглянуті алгоритми контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водороду передбачають, що тест-вплив виду (2) здійснюється на частоті  $\omega_0 = \tau_0^{-1}$ , тобто для реалізації розглянутих алгоритмів необхідно отримати априорно інформацію про величину параметра  $\tau_0$ .

Для визначення величини цього параметра запишемо вираз, обернений до виразу для амплітудно-фазової частотної характеристики газогенератора  $W(j\omega)$  [3]

$$\begin{aligned} W^{-1}(j\omega) &= A^{-1}(\omega) \exp[-j\varphi(\omega)] = \\ &= A^{-1}(\omega) [\cos\varphi(\omega) - j\sin\varphi(\omega)] = K^{-1}(1 + j\omega\tau_0), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $j$  – мнимая единица.

Из (10) следует система двух уравнений с искомым параметром  $\tau_0$

$$\begin{aligned} K^{-1} &= A^{-1}(\omega) \cos\varphi(\omega); \\ \omega\tau_0 K^{-1} &= -A^{-1}(\omega) \sin\varphi(\omega), \end{aligned} \quad (11)$$

решением которой является

$$\tau_0 = -\omega^{-1} \operatorname{tg}\varphi(\omega). \quad (12)$$

Таким образом, получение априори информации о величине параметра  $\tau_0$  сводится к формированию на газогенератор тест-воздействия в виде (2) на фиксированной частоте  $\omega = \omega_1$ , измерению угла сдвига фаз между гармоническими составляющими (3) и (2) с последующим использованием выражения (12) при  $\omega = \omega_1$ .

**Выводы.** Применительно к генератору системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ разработан алгоритм контроля его технического состояния, включающий три подалгоритма. Первый подалгоритм предусматривает определение величины обобщенной постоянной времени  $\tau_0$  с использованием соотношения (12). Второй и третий подалгоритмы используются непосредственно для определения технического состояния газогенератора. С этой целью используются критерии соответственно (8) и (9).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Система хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей. – Х.: ISBN966-03-1944-3, 2002. – 277 с.
2. Кривцова В.И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения водорода на автотранспорте / В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка. – Х.: НУГЗУ, 2013. – 236 с.
3. Абрамов Ю.А. Основы пожарной безопасности / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХИПБ, 1993. – 288 с.
4. Пат. 114098 Україна, МПК G01L23/00. Спосіб контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню / Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І.; власник Національний універ-

ситет цивільного захисту України. – №201609775; заявл. 22.09.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4.

5. Абрамов Ю.А. Мониторинг технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода [Электронный ресурс] / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, А.С. Фуников // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2016. – Вип. 24. – С. 3-8. – Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol24/abramov.pdf>.

*Получено редколлегией 07.03.2017*

Ю.О. Абрамов, В.Г. Борисенко, В.І. Кривцова

**Алгоритм контролю технічного стану газогенератора системи зберігання і подачі водню**

Представлено алгоритм визначення технічного стану газогенератора системи зберігання і подачі водню, в основі якого лежить використання частотних характеристик газогенератора.

**Ключевые слова:** газогенератор, частотні характеристики, постійна часу.

Y.A. Abramov, V.G. Borisenko, V.I. Krivtsova

**Control algorithm the technical state of gas generator of hydrogen storage and supply system**

An algorithm for determining the technical state of gas generator of hydrogen storage and supply system, which based on using of the frequency characteristics of the gas generator have been represented.

**Keywords:** gas generator, time constant, frequency characteristics.