

Ю.А. Абрамов, д.т.н., гл. научн. сотр., НУГЗУ,
В.И. Кривцова, д.т.н., профессор, НУГЗУ,
А.С. Фуников, ХГ – 116

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОРОДА

Обоснован алгоритм мониторинга технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода с учетом его динамических свойств.

Ключевые слова: система хранения и подачи водорода, мониторинг, технической состояние, аварийная ситуация.

Постановка проблемы. Эффективность использования водорода определяется не только его свойствами, но и характеристиками его системы хранения и подачи. Для длительно функционирующих энергетических установок целесообразно использовать хранение водорода в химически связанном состоянии, в частности, в форме гидридов металлов и интерметаллидов [1]. В состав таких систем хранения и подачи водорода одним из основных элементов входит газогенератор водорода.

Одной из проблем при эксплуатации систем хранения и подачи водорода является обеспечение нормативного уровня безопасности.

Анализ последних исследований и публикаций. Научные основы создания систем хранения и подачи водорода на основе твердых водородсодержащих веществ для длительно функционирующих энергетических установок представлены в [1]. Там же приведено решение задачи анализа уровня пожаровзрывобезопасности таких систем, а также представлен алгоритм синтеза систем хранения и подачи водорода по критерию допустимого уровня вероятности возникновения пожара (взрыва). В [2] получены оценки, характеризующие вероятность разрушения системы хранения и подачи водорода, обусловленную выходом технологических параметров за пределы нормативных требований.

Следует отметить, что все технические решения касательно систем хранения и подачи водорода, включающих в свой состав газогенераторы, не предусматривают мониторинг технических характеристик до их штатного использования.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является разработка алгоритма для проведения мониторинга технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода, учитывающего его динамические свойства.

Динамические процессы, протекающие в газогенераторе системы хранения и подачи водорода на основе гидрореагирующих составов (ГРС) для квазипостоянного состава продуктов газогенерации, описываются системой дифференциальных уравнений [1]

$$\tau_p \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = -K_{11}\Delta F - K_{12}\Delta T; \quad (1)$$

$$\tau_T \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = -K_{21}\Delta F - K_{22}\Delta T, \quad (2)$$

где τ_p , τ_T – постоянные времени; K_{1i} , K_{2i} – параметры, имеющие смысл коэффициентов передачи ($i=1,2$); ΔP , ΔT – приведенные малые отклонения соответственно давления и температуры в полости газогенератора относительно их значений в квазистационарном режиме работы; ΔF – приведенное малое отклонение площади выходного отверстия газогенератора относительно его значения в стационарном состоянии.

После объединения (1) и (2) будет иметь место

$$\begin{aligned} \tau_p \tau_T \frac{d^2 \Delta P}{dt^2} + (\tau_p + \tau_T) \frac{d\Delta P}{dt} + (1 + K_{12}K_{22})\Delta P = \\ = -\tau_T K_{11} \frac{d\Delta F}{dt} + (K_{12}K_{21} + K_{11})\Delta F. \end{aligned} \quad (3)$$

Дифференциальному уравнению (3) будет соответствовать передаточная функция

$$W(s) = \frac{\Delta P(s)}{\Delta F(s)} = \frac{K_{11} + K_{12}K_{21} - \tau_T K_{11}s}{\tau_p \tau_T s^2 + (\tau_p + \tau_T)s + K_{12}K_{22} + 1}, \quad (4)$$

где $\Delta P(s) = L[\Delta P(t)]$; $\Delta F(s) = L[\Delta F(t)]$; L – оператор интегрального преобразования Лапласа.

Переходя к стандартной форме представления (4), выражение для передаточной функции газогенератора будет иметь вид

$$W(s) = K \frac{1 - \tau_1 s}{(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} K &= \frac{K_{11} + K_{12}K_{21}}{1 + K_{12}K_{22}}; \quad \tau_1 = \frac{\tau_T K_{11}}{K_{11} + K_{12}K_{21}}; \\ \tau_2 &= a_1 - \tau_3; \quad a_1 = \frac{\tau_T + \tau_p}{1 + K_{12}K_{22}}; \quad a_2 = \frac{\tau_T \tau_p}{1 + K_{12}K_{22}}; \\ \tau_3 &= 0,5 \left[a_1 + (a_1^2 - 4a_2)^{0,5} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Передаточной функции (5) будет соответствовать логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) $l(\omega)$ газогенератора

$$l(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (7)$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) газогенератора, выражение для которой имеет вид

$$A(\omega) = K \prod_{i=1}^3 A_i(\omega). \quad (8)$$

В этом выражении АЧХ $A_i(\omega)$ описываются согласно (5) функциями [3]

$$A_1(\omega) = (1 + \omega^2 \tau_1^2)^{0,5}; \quad A_2(\omega) = (1 + \omega^2 \tau_2^2)^{-0,5}; \quad A_3(\omega) = (1 + \omega^2 \tau_3^2)^{-0,5}. \quad (9)$$

На рис. 1 приведена графическая зависимость (7) для случая, когда в газогенераторе системы хранения и подачи водорода на основе ГРС с вертикально ориентированными реакционными поверхностями расход водорода составляет $4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ при соотношении площади сечения выходного отверстия газогенератора и площади поверхности газовыделения, равном 0,02. Для такого режима работы газогенератора параметры передаточной функции (5) равны [1]

$$K = 1,33 \text{ кг}(\text{м}^3 \cdot \text{с}^2)^{-1}; \quad \tau_1 = 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \tau_2 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \tau_3 = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Из анализа зависимости $l(\omega)$ – график 1 следует, что эта зависимость может быть аппроксимирована зависимостью $l_0(\omega)$ – график 2, которая соответствует ЛАЧХ апериодического звена с частотой сопряжения ω_0 , определяемой из выражения

$$\omega_0 = \omega_3 + 0,5(\omega_2 - \omega_1) = \tau_3^{-1} + 0,5(\tau_2^{-1} - \tau_1^{-1}) = \tau_0^{-1}, \quad (10)$$

где τ_0 – постоянная времени.

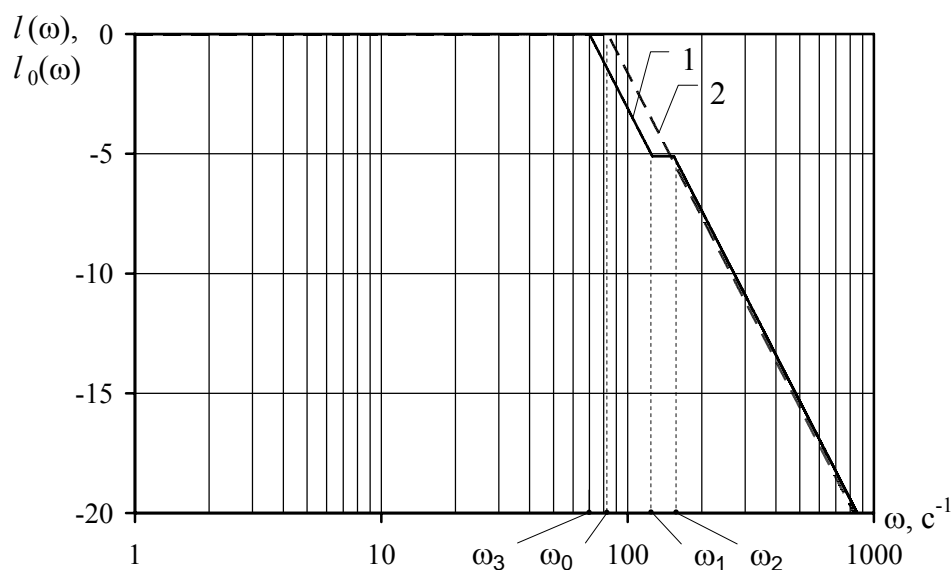


Рис. 1. ЛАЧХ газогенератора на основе ГРС: 1 – $l(\omega)$; 2 – $l_0(\omega)$

Тогда передаточную функцию (5) можно заменить на передаточную функцию вида

$$W_0(p) = K(\tau_0 s + 1)^{-1}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого случая $\tau_0 = 12,0 \cdot 10^{-3}$ с.

На рис. 2 приведены графические зависимости для $A(\omega)$ и $A_0(\omega)$, где

$$A_0(\omega) = K(1 + \omega^2 \tau_0^2)^{-0,5}, \quad (12)$$

а на рис. 3 – зависимость погрешности рассогласования

$$\delta = \text{mod}[K^{-1}[A(\omega) - A_0(\omega)]] . \quad (13)$$

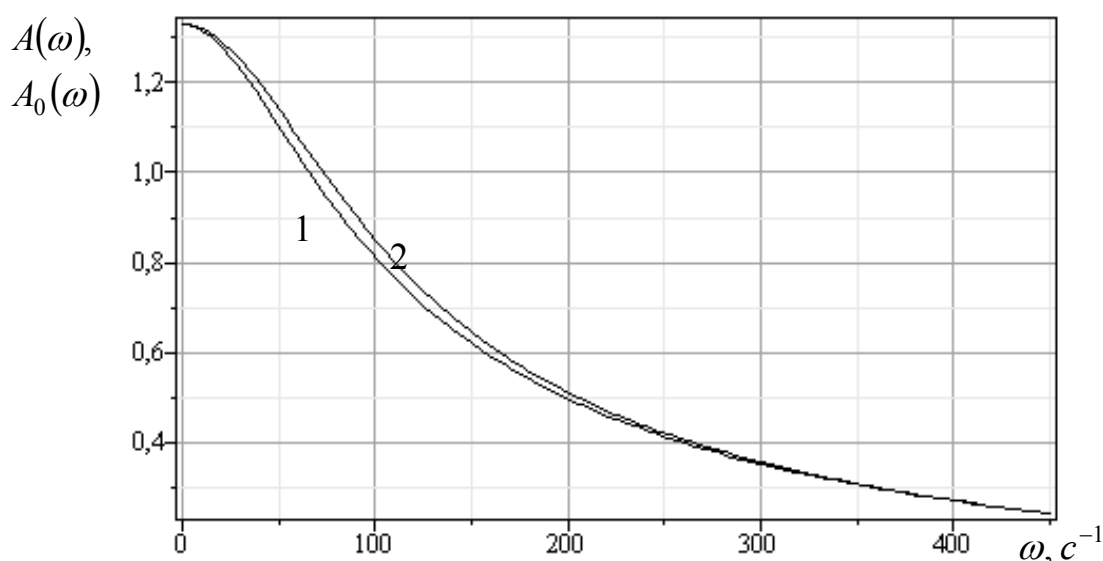


Рис. 2. АЧХ газогенератора на основе ГРС: 1 – $A(\omega)$; 2 – $A_0(\omega)$

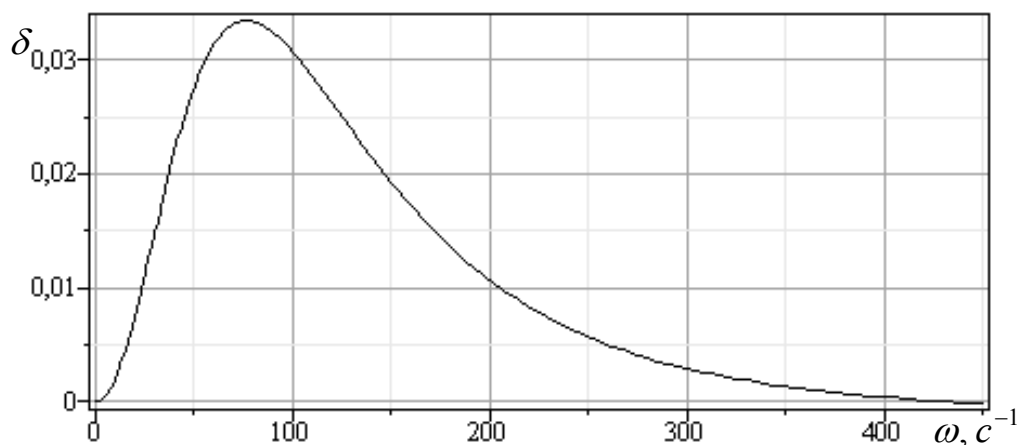


Рис. 3. Погрешность рассогласования между $A(\omega)$ и $A_0(\omega)$

Анализ этих зависимостей свидетельствует о том, что при использовании АЧХ $A_0(\omega)$ вместо $A(\omega)$ максимальное значение погрешности рассогласования не превышает 3,5%.

Аппроксимация функции $A(\omega)$ функцией $A_0(\omega)$ позволяет реализовать алгоритм мониторинга технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода, который учитывает его динамические свойства.

С этой целью при фиксированной площади $F_0 = \text{const}$ выходного отверстия газогенератора осуществляется измерение давления $P_0 = \text{const}$ в его полости. После этого производится изменение площади $\Delta F(t)$ выходного отверстия газогенератора по синусоидальному закону с частотой $\omega = \omega_0$, т.е.

$$\Delta F(t) = F_0 + F_m \sin \omega_0 t, \quad (14)$$

где F_m – амплитуда, величина которой задается априори.

Изменению площади $\Delta F(t)$ в соответствии с (14) будет соответствовать изменение давления $\Delta P(t)$ в полости газогенератора, которое будет определяться выражением

$$\Delta P(t) = P_0 + P_m \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (15)$$

где P_m – амплитуда переменной составляющей давления в полости газогенератора; φ – угол сдвига фаз между $\Delta P(t)$ и $\Delta F(t)$.

Между параметрами зависимостей (14) и (15) существует соотношение

$$P_0 P_m^{-1} = F_0 A_0(0) [F_m A_0(\omega_0)]^{-1}. \quad (16)$$

Из выражения (12) следует, что

$$A = 1/(q_1 \cdot \eta_T); \quad A_0(\omega_0) = \frac{K}{\sqrt{2}}, \quad (17)$$

вследствие чего (16) трансформируется к виду

$$P_0 P_m^{-1} = \sqrt{2} F_0 F_m^{-1}. \quad (18)$$

Если априори задать малое число ε , то результат мониторинга технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода может быть получен с использованием критерия

$$\left| P_0 P_m^{-1} - \sqrt{2} F_0 F_m^{-1} \right| \leq \varepsilon, \quad (19)$$

т.е. при выполнении этого условия техническое состояние газогенератора будет соответствовать нормативным требованиям.

Использование критерия (19) предполагает кроме измерения пара параметра P_0 еще и измерение параметра P_m .

Смысл критерия заключается в том, что техническое состояние газогенератора системы хранения и подачи водорода на основе ГРС соответствует нормативным требованиям, если по результатам его мониторинга в соответствии с рассмотренным алгоритмом фигуративная точка будет принадлежать области, определяемой величиной параметра ε относительно точки с координатами ω_0 , $A_0(\omega_0)$ зависимости $A_0(\omega)$. Выход фигуративной точки за пределы этой области свидетельствует о возникновении отказа газогенератора системы хранения и подачи водорода, что обуславливает появление тенденции к возникновению аварийной ситуации.

Выводы. Обоснована возможность описания динамических процессов, протекающих в газогенераторе системы хранения и подачи водорода на основе ГРС, в более простой форме, что открывает возможность для формирования алгоритма проведения мониторинга технического состояния такого генератора. Реализация алгоритма предполагает измерение динамических параметров на фиксированной частоте, определяемой величиной постоянной времени газогенератора. Предложен критерий для оценки технического состояния газогенератора по результатам мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Системы 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 автоматики / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХИПБ, 1993. – 288 с.

Получено редколлегией 14.10.2016

Ю.О. Абрамов, В.И. Кривцова, А.С. Фуніков

Моніторинг технічного стану газогенератора системи зберігання і подачі водню

Обґрунтовано алгоритм моніторингу технічного стану газогенератора системи зберігання і подачі водню з врахуванням його динамічних властивостей.

Ключові слова: система зберігання і подачі водню, моніторинг, технічний стан, аварійна ситуація.

Y.A. Abramov, V.I. Krivtsova, A.S. Funitykov

Monitoring the technical state of the gas generator of hydrogen storage and supply system

The algorithm of monitoring the technical state of the gas generator of hydrogen storage and supply system is substantiated. It takes into account its dynamic properties.

Keywords: hydrogen storage and supply system, monitoring, technical state, emergency.