

*Ю.А. Абрамов, д.т.н., гл. научн. сотр., НУГЗУ,  
В.И. Кривцова, д.т.н., профессор, НУГЗУ*

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОДОРОДА**

Разработан алгоритм контроля технического состояния генератора водорода с использованием его частотных характеристик.

**Ключевые слова:** газогенератор, частотные характеристики, динамические свойства, техническое состояние.

**Постановка проблемы.** Чрезвычайное событие, в частности, техногенного характера состоит в резком отклонении от нормы процессов, которые происходят и имеют существенное отрицательное влияние на функционирование систем и окружающую среду [1]. Важное место по снижению вероятности появления таких событий занимает мониторинг технического состояния потенциально опасных технических объектов. К их числу относятся объекты, технические процессы в которых предусматривают получение, хранение, транспортировку и др. водорода и водородсодержащих газов. Одной из проблем эксплуатации таких объектов является обеспечение безопасного технологического процесса генерации водорода.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Достаточно полно информация о процессах, имеющих место при получении водорода, в частности, из твердых веществ и жидких веществ, представлена в работе [2]. В работах [3, 4] представлены результаты исследований по изучению пожаровзрывоопасных свойств водородсодержащих систем. Для обеспечения безопасного функционирования таких систем осуществляется контроль их параметров [5]. Контролируемыми параметрами являются такие параметры, которые характеризуют локальные свойства систем и, в подавляющем большинстве случаев, не учитывают динамические свойства этих систем [6]. В работе [7] предложен способ контроля технического состояния одного из основных элементов систем хранения водорода – генератора водорода. Этот способ основан на определении принадлежности фигуративной точки некоторой области, принадлежащей амплитудно-частотной характеристике генератора водорода. Недостатком такого алгоритма является низкая достоверность при определении технического состояния генератора водорода.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является обоснование возможности повышения достоверности при определении технического состояния газогенератора систем хранения и подачи водорода.

Процессы, имеющие место в газогенераторе при генерации водорода, описываются системой дифференциальных уравнений [2]

$$\begin{aligned}\tau_P \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P &= -K_{11}\Delta F - K_{12}\Delta T; \\ \tau_T \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T &= K_{21}\Delta P - K_{22}\Delta F,\end{aligned}\quad (1)$$

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

После объединения дифференциальных уравнений системы (1) получим дифференциальное уравнение второго порядка, которому будет соответствовать передаточная функция вида

$$W(S) = \Delta P(S)[\Delta F(S)]^{-1} = K(1 - \tau_1 S)[(1 + \tau_2 S)(1 + \tau_3 S)]^{-1}, \quad (2)$$

где учтены обозначения:

$$\begin{aligned}K &= (K_{11} + K_{12}K_{21})(1 + K_{12}K_{22})^{-1}; \\ \tau_1 &= \tau_T K_{11}(K_{11} + K_{12}K_{21})^{-1}; \quad \tau_2 = a_1 - \tau_3; \\ a_1 &= (\tau_P + \tau_T)(1 + K_{12}K_{22})^{-1}; \quad a_2 = \tau_T \tau_P(1 + K_{12}K_{22})^{-1}; \\ \tau_3 &= 0,5 [a_1 + (a_1^2 - 4a_2)^{0,5}].\end{aligned}\quad (3)$$

В (2)  $\Delta P(S)$ ,  $\Delta F(S)$  – изображения по Лапласу функций времени  $\Delta P(t)$ ,  $\Delta F(t)$  соответственно;  $S$  – комплексная переменная.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) газогенератора определяется выражением

$$W(j\omega) = W(S = j\omega) = K(1 - j\omega\tau_1)[(1 + j\omega\tau_2)(1 + j\omega\tau_3)]^{-1}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $j$  – мнимая единица.

После умножения числителя и знаменателя дроби (4) на комплексно сопряженную функцию вида

$$1 - \omega^2\tau_2\tau_3 - j\omega(\tau_2 + \tau_3), \quad (5)$$

выражение (4) трансформируется следующим образом

$$W(j\omega) = M(\omega) + jN(\omega), \tag{6}$$

где  $M(\omega)$ ,  $N(\omega)$  – вещественная частотная характеристика (ВЧХ) и мнимая частотная характеристика (МЧХ) газогенератора соответственно, которые имеют вид:

$$M(\omega) = [1 - \omega^2(\tau_1\tau_2 + \tau_1\tau_3 + \tau_2\tau_3)][1 + \omega^2(\tau_2^2 + \tau_3^2 + \omega^2\tau_2^2\tau_3^2)]^{-1}; \tag{7}$$

$$N(\omega) = -[\omega(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 - \omega^2\tau_1\tau_2\tau_3)][1 + \omega^2(\tau_2^2 + \tau_3^2 + \omega^2\tau_2^2\tau_3^2)]^{-1}. \tag{8}$$

С учетом (7) и (8) выражения для амплитудной частотной характеристики (АЧХ)  $A(\omega)$  и фазовой частотной характеристики (ФЧХ)  $\varphi(\omega)$  газогенератора можно записать следующим образом

$$A(\omega) = [M^2(\omega) + N^2(\omega)]^{0,5}; \tag{9}$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}[N(\omega)[M(\omega)]^{-1}]. \tag{10}$$

На рис. 1-4 приведены графические зависимости для частотных характеристик газогенератора, построенные в соответствии с (6)-(10) для случая, когда в газогенераторе системы хранения и подачи водорода на основе гидрореагирующих составов с вертикально ориентированными реагирующими поверхностями расход водорода составляет  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  кг·с<sup>-1</sup> при соотношении площади выходного отверстия газогенератора и площади поверхности газовыделения, равном 0,002. Для такого режима работы газогенератора параметры передаточной функции (3) равны [1]:  $K = 1,33$  кг(м<sup>3</sup>с<sup>-2</sup>)<sup>-1</sup>;  $\tau_1 = 7,9$  мс;  $\tau_2 = 6,5$  мс;  $\tau_3 = 14,4$  мс.

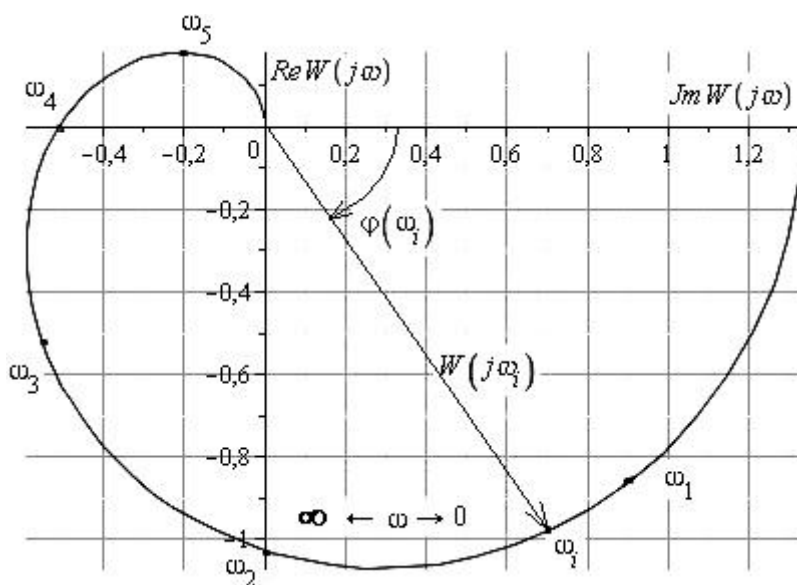


Рис. 1. Амплитудно-фазовая частотная характеристика газогенератора

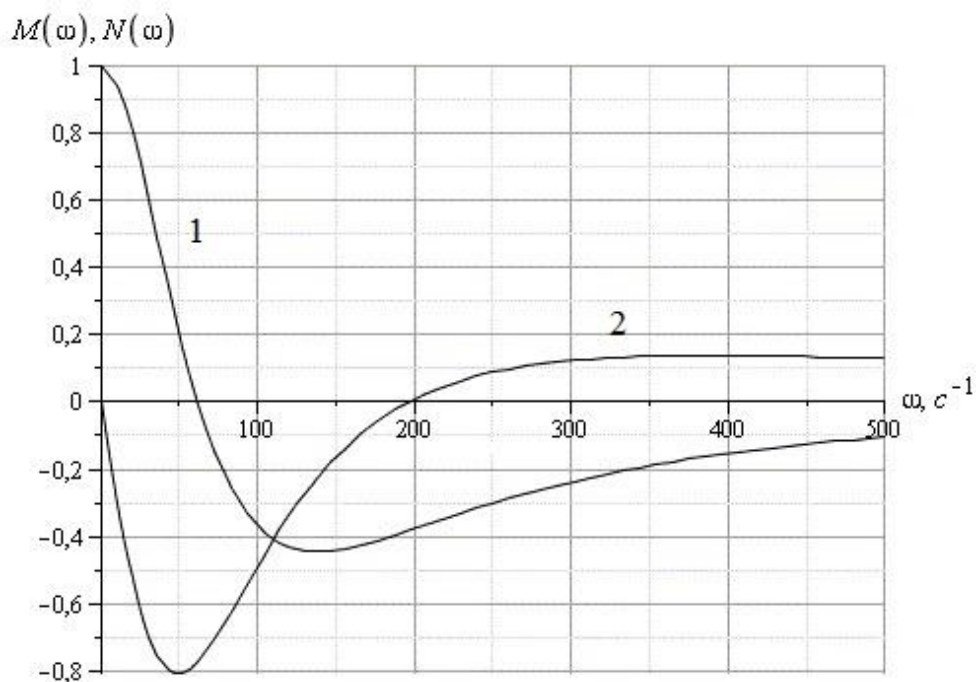


Рис. 2. Вещественная и мнимая частотные характеристики газогенератора: 1 – ВЧХ; 2 – МЧХ

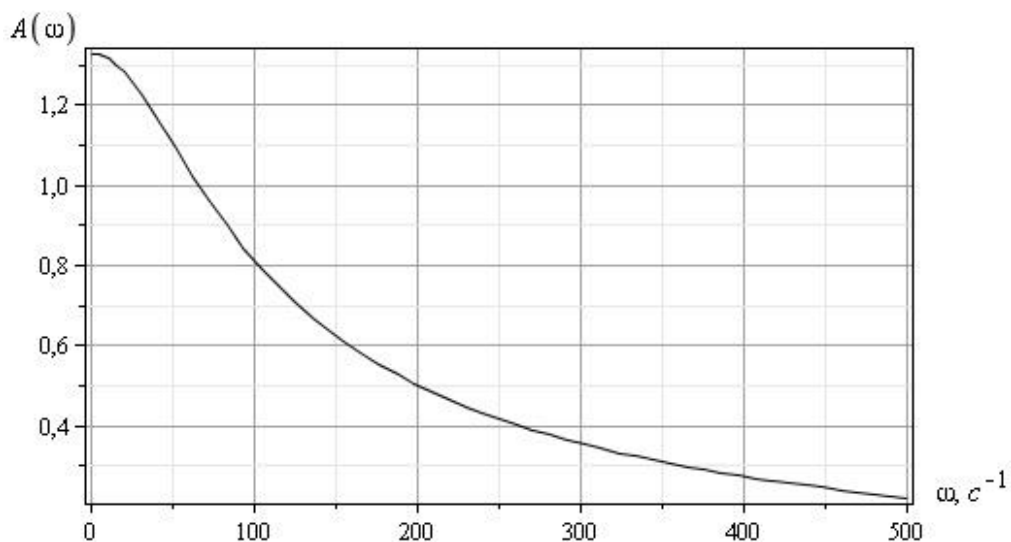


Рис. 3. Амплитудная частотная характеристика газогенератора

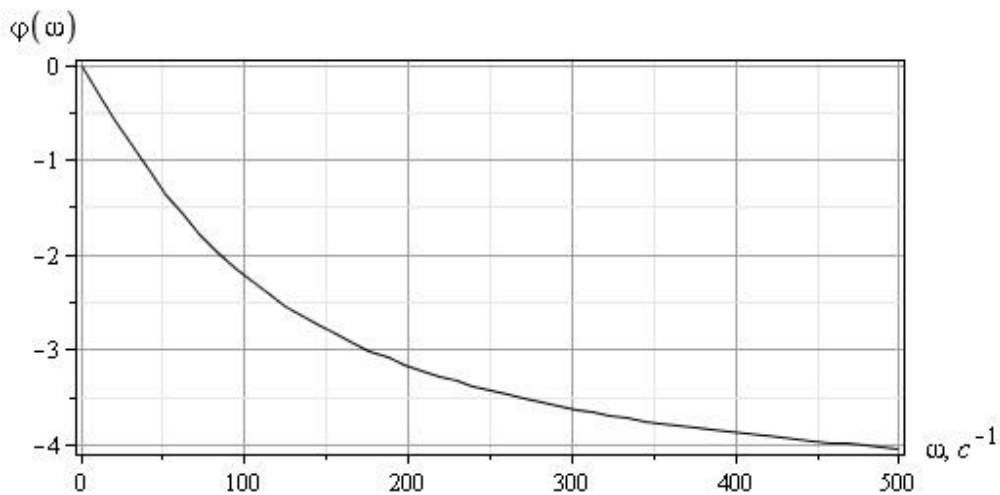


Рис. 4. Фазовая частотная характеристика газогенератора

Следует отметить, что графическая зависимость, определяющая поведение годографа вектора  $W(j\omega)$  на комплексной плоскости (рис. 1), является параметрической, параметром которой является частота  $\omega$ . Это обстоятельство предопределяет выбор контрольных точек для реализации алгоритма технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода. В качестве таких контрольных точек могут быть точки, принадлежащие годографу вектора  $W(j\omega)$ , и которым соответствуют значения частоты  $\omega_i$ , где  $i = \overline{1, n}$ . Кроме того, каждой такой  $i$  – ой контрольной точке будет соответствовать угловая координата  $\varphi(\omega_i)$  (см. рис. 1).

Если априори заданы  $n$  – значений частоты  $\omega_i$ , а также соответствующие им угловые координаты  $\varphi_i$ , имеющие смысл углов сдвига фаз между давлением в полости газогенератора  $\Delta P(t)$  и площадью его выходного отверстия  $\Delta F(t)$ , то в качестве критерия для определения технического состояния газогенератора целесообразно использовать выражения

$$|\varphi(\omega_i) - \varphi_i| \leq \varepsilon, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где  $\varphi(\omega_i)$  – измеренное значение ФЧХ газогенератора на частоте  $\omega_i$ ;  $\varepsilon$  – малое число.

Алгоритм определения технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода сводится к реализации следующих процедур:

- априорное задание параметров  $\omega_i$ ,  $\varphi_i$  и  $\varepsilon$ , где  $i = \overline{1, n}$ ;
- измерение в установившемся режиме работы значений  $\varphi(\omega_i)$ ;
- сравнение  $\varphi(\omega_i)$  с  $\varphi_i$  в соответствии с критерием (11);
- повтор последних трех процедур  $n-1$  – раз;
- принятие решения о техническом состоянии газогенератора системы хранения и подачи водорода.

Техническое состояние газогенератора принимается таким, которое соответствует требованиям нормативных документов, если для всех  $i \in [1, n]$ , выполняются условия (11).

Характер изменения частотных характеристик  $W(j\omega)$ ,  $M(\omega)$  и  $N(\omega)$  позволяет конкретизировать выбор параметров  $\omega_i$  и  $\varphi_i$ . В частности, если положить, что

$$\varphi_i = -\frac{i\pi}{4}, \quad i = \overline{1, 5}, \quad (12)$$

то будут выполняться условия (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} i = 1, & \quad M(\omega_1) = -N(\omega_1); \\ i = 2, & \quad M(\omega_2) = 0; \\ i = 3, & \quad M(\omega_3) = -N(\omega_3); \\ i = 4, & \quad M(\omega_4) = 0; \\ i = 5, & \quad -M(\omega_5) = N(\omega_5). \end{aligned} \quad (13)$$

Условиям (13) с учетом выражений (7) и (8) будут соответствовать алгебраические уравнения для определения параметров  $\omega_i$ , которые имеют вид:

$$i = 1; 5, \quad \omega_i^3 \prod_{k=1}^3 \tau_k - \omega_i^2 (\tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_3 + \tau_2 \tau_3) - \omega_i \sum_{k=1}^3 \tau_k + 1 = 0; \quad (14)$$

$$i = 2, \quad \omega_2^2 (\tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_3 + \tau_2 \tau_3) - 1 = 0; \quad (15)$$

$$i = 3, \quad \omega_3^3 \prod_{k=1}^3 \tau_k + \omega_3^2 (\tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_3 + \tau_2 \tau_3) + \omega_3 \sum_{k=1}^3 \tau_k - 1 = 0; \quad (16)$$

$$i = 4, \quad \omega_4^2 \prod_{k=1}^3 \tau_k - \sum_{k=1}^3 \tau_k = 0. \quad (17)$$

Примечание. Вследствие того, что  $\omega_1 < \omega_5$ , что следует из рис. 1, то параметру  $\omega_1$  соответствует меньший положительный корень алгебраического уравнения (14), а параметру  $\omega_5$  – больший положительный корень этого уравнения.

Для рассматриваемого примера алгебраические уравнения (14)-(17) имеют следующие решения

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 27,8 \text{ с}^{-1}; & \omega_2 &= 61,2 \text{ с}^{-1}; & \omega_3 &= 110,4 \text{ с}^{-1}; \\ \omega_4 &= 196,5 \text{ с}^{-1}; & \omega_5 &= 435,2 \text{ с}^{-1}; \end{aligned} \quad (18)$$

На рис. 5 приведен графический вариант определения значений параметров  $\omega_i$ , который сводится к идентификации этих значений в точках  $1 \div 5$ . Этим точкам соответствует решения системы уравнений вида

$$\varphi(\omega_i) + \frac{i\pi}{4} = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (19)$$

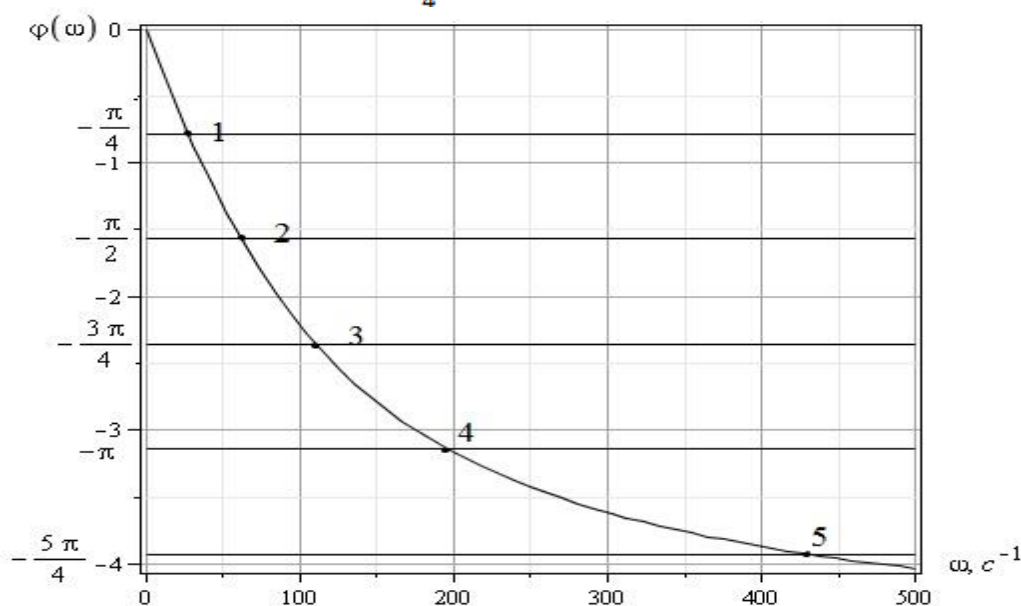


Рис. 5. К определению значений параметров  $\omega_i$

В рассматриваемом случае реализация алгоритма контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода предусматривает пятикратное измерение значений ФЧХ газогенератора практически во всем диапазоне его рабочих частот. Такой подход к построению алгоритма контроля обеспечивает существенное увеличение количества получаемой информации о техническом состоянии газогенератора, что приводит к повышению достоверности при оценке его технического состояния, в частности, по сравнению с алгоритмом, который предложен в [7]. В этой работе алгоритм контроля технического состояния газогенератора системы хранения и подачи водорода основан на измерении информационного параметра лишь на одной, априори заданной частоте.

**Выводы.** Для определения технического состояния газогенераторов системы хранения и подачи водорода целесообразно использовать его динамические характеристики, в частности, фазово-частотную характеристику. Тестирование газогенератора осуществляется с помощью гармонического сигнала – изменения площади выходного отверстия газогенератора на априори заданных частотах, значения которых принадлежат рабочему диапазону частот. Информационными параметрами служат значения фазово-частотной характеристики на этих частотах, которые сравниваются с априори заданными значениями. Работоспособность газогенератора определяется по расположению фигуративной точки относительно заданной области на частотной характеристике газогенератора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основы мониторинга и управления в условиях чрезвычайных ситуаций [Текст]: учебник / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, В.В. Тютюник и др. – Х.: АГЗУ, 2005. – 257 с.
2. Абрамов, Ю.А. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок [Текст]/ Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей. – Харьков: 2002. – 277 с. – ISBN 966 –03 –1094 – 3.
3. Кривцова В.И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения на автотранспортных средствах [Текст]/ В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка. – Х.: НУЦЗУ, 2013. – 236 с.
4. Кривцова В.И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения водорода в форме обратимых гидридов интерметаллидов [Текст]/ В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка, В.П. Борисенко. – Х.: НУЦЗУ, 2014. – 108 с.
5. Dmitriev A.L., Ikonnikov V.K. (2017). Hydrogen fueling station using hydrogen generation by aluminum powder hydrothermal oxidation [Text] / Alternative Energy and Ecology (ISJAE), 10 – 12, 75 – 85. DOI 10.15518/isjaee, 2017, 10–12, 075 – 085.

6. Kudryavtsev P.G., Figovsky J.L. (2016). System of storage and hydrogen generation for power propulsion systems and cars [Text] / Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 13–14, 46 – 55. DOI 10.15518/isjaee, 2016, 13–14, 046–055.

7. Спосіб контролю технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню [Текст]: пат.114098 Україна: МПК С 01 В 3/06 / Абрамов Ю.О., Борисенко В.Г., Кривцова В.І.; заявник і патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – № 201609775; заявл. 22.09.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. N 4.

*Получено редколлегией 05.10.2017*

Ю.О. Абрамов, В.І. Кривцова

**До визначення технічного стану газогенератора системи зберігання та подачі водню**

Розроблено алгоритм контролю технічного стану генератора водню з використанням його частотних характеристик.

**Ключові слова:** газогенератор, частотні характеристики, динамічні властивості, технічний стан.

Y.A. Abramov, V.I. Krivtsova

**To determine the technical state of the gas generator of the hydrogen storage and supply system**

An algorithm for monitoring the technical state of a hydrogen generator is developed using its frequency characteristics.

**Keywords:** gas generator, frequency characteristics, dynamic properties, technical condition.