

УДК 536.51:681.5.015.3

Идентификация динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ,
ул. К. Маркса, 10, 420111, г. Казань, Россия

Поступила 02.05.2016

Принята к печати 10.08.2016

В соответствии с отраслевым стандартом определение динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов (ДТГ) должно производиться только на аттестованных воздушных установках по зарегистрированным экспериментальным переходным характеристикам. Экспериментальные переходные характеристики содержат помехи различной природы и могут повлиять на точность идентификации искомых динамических характеристик ДТГ. С целью повышения точности идентификации динамических характеристик авиационных ДТГ предложен новый метод. Метод основан на использовании амплитудного спектра сигнала, сформированного из экспериментальных переходных характеристик. Сформированный сигнал представляет собой импульсный затухающий сигнал, удовлетворяющий условиям Дирихле, и к нему может быть применено преобразование Фурье для получения амплитудного спектра. Для трех математических моделей ДТГ выведены соотношения, связывающие амплитудные спектры сформированных сигналов с постоянными времени искомых динамических характеристик. Исследования показали, что основная информация о динамических свойствах штатных авиационных ДТГ сосредоточена в низкочастотной части амплитудного спектра в диапазоне примерно от 0 до 1 рад/с и с гарантией – до 3 рад/с. Установлено, что при использовании низкочастотной части амплитудного спектра для идентификации динамических характеристик ДТГ, наличие помех в переходных характеристиках с частотой выше 3 рад/с не будет оказывать влияния на точность получаемых результатов. Амплитудный спектр сформированного сигнала может быть определен с помощью измерительных приборов в виде низкочастотных анализаторов спектра или вычислен в математических пакетах, содержащих функции быстрого преобразования Фурье. Установление значений постоянных времени выбранной математической модели ДТГ по информативной части амплитудного спектра может быть реализовано с помощью регрессионного анализа или путем использования встроенных процедур, имеющих в различных системах обработки данных. Таким образом, показано, что предлагаемый метод позволит повысить точность идентификации динамических характеристик авиационных ДТГ.

Ключевые слова: динамические характеристики, идентификация, датчики температуры газов, спектральный анализ, амплитудный спектр.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

Адрес для переписки:

Сабитов А.Ф.
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
ул. К. Маркса, 10, 420111, г. Казань, Россия
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

Address for correspondence:

Sabitov A.F.
A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,
10, K. Marx str., Kazan, Tatarstan, 420111, Russia
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

Для цитирования:

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.
Идентификация динамических характеристик авиационных
датчиков температуры газов.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 211–218.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

For citation:

Sabitov A.F., Safina I.A.
[Identification of dynamic characteristics of aircraft gas temperature
sensors]. optoelectronic module lens scattering].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 211–218 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

Identification of dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors

Sabitov A.F., Safina I.A.

*A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,
K. Marx str., 10, 420111, Kazan, Tatarstan, Russia*

Received 02.05.2016

Accepted for publication 10.08.2016

Abstract. The estimation of dynamic behavior of aircraft gas temperature sensors (GTS) has to be done only in certified air installations and be based on recorded experimental transient response in accordance with the departmental standard. Experimental transient response has hindrances of different nature and can influence the accuracy of identification of dynamic behaviour of GTS. We suggested a new method to increase the accuracy of identification of dynamic behavior of GTS. The method is based on the use of amplitude spectrum of signal composed of experimental transient response. Shaped signal is an impulse decaying signal satisfying a Dirichlet condition and Fourier transform can apply to it to get amplitude spectrum. We worked out the relation between amplitude spectrum of shaped signals and time constant of dynamic behaviour for three mathematical models of GTS. The research showed that the information about dynamic behaviour of standard aircraft GTS is located in LF part of amplitude spectrum in the range of 0 to 1 rad/s and to 3 rad/s. The study revealed that hindrance in the transient response at frequency higher than 3 rad/s did not influence the accuracy of results if to use LF part of amplitude spectrum for the identification of dynamic behaviour of GTS. The amplitude spectrum of shaped signal can be estimated by measuring equipment like LF spectrum analyzer or calculated by software package with the function of fast Fourier transform. The value of time constant of certain mathematical model of GTS can be realized with the help of regression analysis or the use of embedded resources of different data processing systems. Thus, the method gives an opportunity to increase the accuracy of identification of dynamic behavior of GTS.

Keywords: dynamic behavior, identification, gas temperature sensor, spectral analysis, amplitude spectrum.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

Адрес для переписки:

Сабитов А.Ф.
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
ул. К. Маркса, 10, 420111, г. Казань, Россия
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

Address for correspondence:

Sabitov A.F.
A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,
10, K. Marx str., Kazan, Tatarstan, 420111, Russia
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

Для цитирования:

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.
Идентификация динамических характеристик авиационных
датчиков температуры газов.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 211–218.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

For citation:

Sabitov A.F., Safina I.A.
[Identification of dynamic characteristics of aircraft gas temperature
sensors].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 211–218 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

Введение

Известно большое число методов идентификации динамических характеристик систем и технических объектов, подробно изложенных, в частности, в работах [1–5]. Имеются также публикации, посвященные идентификации динамических характеристик различных датчиков температуры [6, 7].

Тем не менее, как указывается в [8], не следует ожидать создания одного наилучшего метода, а речь, скорее, должна идти о ряде методов различной сложности, трудоемкости и точности, каждый из которых имеет свою область применения, учитывает особенности использования технического объекта и обладает определенными преимуществами и недостатками.

Среди различных технических объектов особенностями идентификации динамических характеристик обладают датчики температуры газов (ДТГ), предназначенные для эксплуатации в проточных частях, в том числе авиационных газотурбинных двигателей. В соответствии с отраслевым стандартом¹ определение динамических характеристик авиационных ДТГ должно производиться на аттестованных испытательных воздушных установках по зарегистрированным экспериментальным переходным характеристикам с применением графоаналитического метода обработки в полулогарифмических координатах. При этом предполагается, что ДТГ в динамическом отношении относятся к линейным средствам измерений с сосредоточенными параметрами. Из отраслевого стандарта¹ следует, что испытания реализуются с помощью воздушной установки, которая обеспечивает охлаждение в воздушном потоке известной скорости предварительно нагретого до заданной температуры ДТГ.

Таким образом, для идентификации динамических характеристик указанных ДТГ предусмотрен только ступенчатый во времени температурный испытательный сигнал, а обработке доступны только экспериментальные переходные характеристики.

На рисунке 1 для примера представлен типичный процесс регистрации экспериментальной переходной характеристики некоторого ДТГ, который получен на аттестованной воздушной установке с соблюдением требований отрасле-

вого стандарта. Процесс регистрации состоит из трех участков. Первый участок *A* начинается с включения аналого-цифрового преобразователя, который с заданной дискретностью регистрирует выходной сигнал с испытуемого ДТГ, и заканчивается включением нагревательной печи, куда предварительно помещен датчик. Второй участок *B* соответствует нагреванию ДТГ до заданной температуры t_n . Третий участок *C* соответствует переходной характеристике, начинающейся с некоторого момента времени τ_0 , когда сдвигается нагревательная печь с датчика, до времени, когда датчик охладится до температуры воздушного потока t_k . На рисунке 2 также для примера показан конечный участок зарегистрированной переходной характеристики того же ДТГ. Из рисунка 2 видно, что регистрируемая переходная характеристика содержит помехи, которые несколько искажают полезный сигнал с датчика и могут повлиять на точность идентификации по ней искомых динамических характеристик.

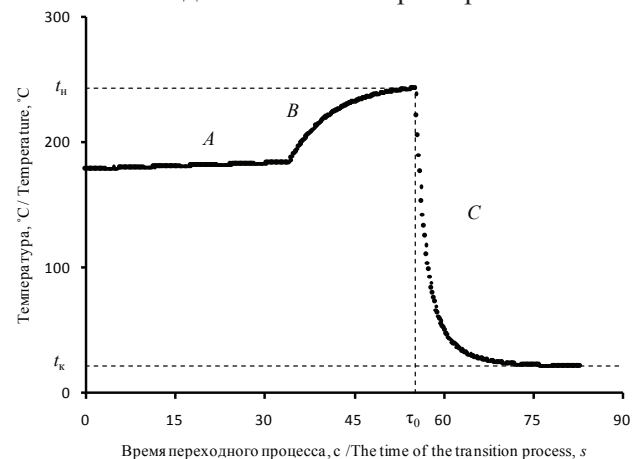


Рисунок 1 – Процесс регистрации переходной характеристики датчика температуры газов

Figure 1 – The process of registering the transient response of gas temperature sensor

Представляет интерес разработка такой методики идентификации динамических характеристик ДТГ по экспериментальным переходным характеристикам, которая бы позволила выделить полезную часть сигнала, где без присутствия помех сосредоточена основная информация о динамических свойствах испытуемого датчика. Подобную задачу мог бы решить спектральный анализ экспериментальной переходной характеристики ДТГ с применением преобразования Фурье, но реализация его для сигнала, изображенного на рисунке 1, невозможна, поскольку он не

¹ ОСТ 1 00418-81. Метод и средства определения динамических характеристик датчиков температур газовых потоков.

удовлетворяет условиям Дирихле и не является абсолютно интегрируемым в бесконечных пределах по времени.

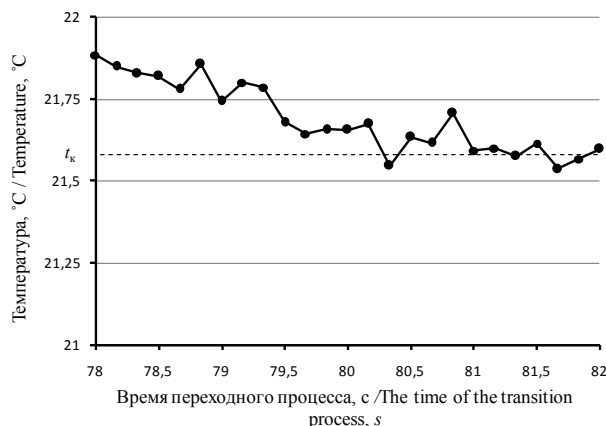


Рисунок 2 – Конечный участок регистрации переходной характеристики датчика температуры газов

Figure 2 – The final registration of land transient response gas temperature sensor

Целью работы являлось повышение точности идентификации искомых динамических характеристик ДТГ путем использования для идентификации информативной части амплитудного спектра сигнала, сформированного из экспериментальной переходной характеристики в определенной последовательности.

Основная часть

Для получения спектра сигнала, однозначно связанного с динамическими характеристиками испытуемого ДТГ, предложен метод, позволяющий преобразовать экспериментальную переходную характеристику вида, изображенного на рисунке 1, в сигнал $s(\tau)$, удовлетворяющий условиям Дирихле.

Формирование сигнала $s(\tau)$ из экспериментальной переходной характеристики производится в следующей последовательности.

1. Начало отсчета переходной характеристики переносится на момент времени τ_0 , соответствующий сдвиганию нагревательной печи с датчика.

2. Из выходного сигнала датчика, начиная с момента времени τ_0 и до окончания переходного процесса, вычитается сигнал, соответствующий установившемуся значению сигнала с датчика.

3. За амплитуду U_m сигнала $s(\tau)$ при $\tau_0 = 0$ с принимается значение:

$$U_m = U_H - U_K,$$

где U_H – значение сигнала с ДТГ в момент сдвигания нагревательной печи; U_K – установившееся значение сигнала с датчика по окончании переходного процесса.

На рисунке 3 изображен сформированный таким образом из экспериментальной переходной характеристики сигнал $s(\tau)$, представляющий собой затухающий импульсный сигнал вида:

$$s(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau < 0 \\ U_H - U_K, & \tau = 0 \\ U(\tau) - U_K, & \tau > 0 \\ 0, & \tau \rightarrow \infty, \end{cases} \quad (1)$$

где $U(\tau)$ – выходной сигнал с датчика, меняющийся от U_H до U_K .

Сигнал вида (1) полностью удовлетворяет условиям Дирихле, является абсолютно интегрируемым в бесконечных пределах по времени, и к нему может быть применено преобразование Фурье для получения, например, амплитудного спектра $|S(j\omega)|$ сигнала $s(\tau)$, характеризующего зависимость модуля комплексной спектральной плотности от круговой частоты ω .

Сигнал $s(\tau)$ может быть получен путем обработки непосредственно переходной характеристики ДТГ или с помощью измерительной системы, входящей в состав воздушной установки, на техническое решение которой получен патент [9].

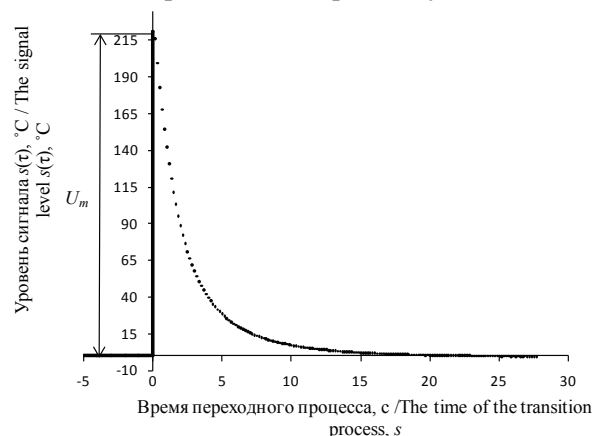


Рисунок 3 – Сформированный из переходной характеристики датчика температуры газов сигнал $s(\tau)$

Figure 3 – Formed from the transient response of the signal gas temperature sensor $s(\tau)$

Если сигнал $s(\tau)$ является непрерывной функцией времени, то к нему можно применить преобразование Фурье и получить комплексную спектральную плотность, спектральную характеристику или просто спектр сигнала вида:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

Модуль комплексной спектральной плотности при этом определяется выражением:

$$|S(j\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}, \quad (2)$$

где $\text{Re}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \cdot \cos(\omega\tau) d\tau$ – вещественная

часть спектра сигнала;

$\text{Im}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \cdot \sin(\omega\tau) d\tau$ – мнимая часть спектра

сигнала;

ω – круговая частота, рад/с;

τ – время переходного процесса, с.

В соответствии с [10] переходные функции $h(\tau)$ первых трех математических моделей ДТГ по степени точности описания процесса нагрева имеют вид:

для модели I:

$$h(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right); \quad (3)$$

для модели II:

$$h(\tau) = 1 - \frac{T_1 - E}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{\tau}{T_1}\right) + \frac{T_2 - E}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{\tau}{T_2}\right); \quad (4)$$

$T_1 > E > T_2$

для модели III:

$$h(\tau) = 1 - \frac{(T_1 - E_1)(T_1 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)} \exp\left(-\frac{\tau}{T_1}\right) + \frac{(T_2 - E_1)(T_2 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_2 - T_3)} \exp\left(-\frac{\tau}{T_2}\right) - \frac{(T_3 - E_1)(T_3 - E_2)}{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)} \exp\left(-\frac{\tau}{T_3}\right); \quad (5)$$

$T_1 > E_1 > T_2 > E_2 > T_3$

В выражениях (3)–(5) параметры T, T_1, T_2, T_3, E, E_1 и E_2 являются постоянными времени соответствующих математических моделей.

Поскольку при испытаниях реализуется охлаждение в воздушном потоке предварительно нагретого датчика, то сигналы с испытуемого ДТГ после преобразования по предлагаемому методу с учетом (3)–(5) принимают вид:

для модели I:

$$s(\tau) = U_m \left[\exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \right] \quad (6)$$

для модели II:

$$s(\tau) = U_m \left[\frac{T_1 - E}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{\tau}{T_1}\right) - \frac{T_2 - E}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{\tau}{T_2}\right) \right]; \quad (7)$$

для модели III:

$$s(\tau) = U_m \left[\frac{(T_1 - E_1)(T_1 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)} \exp\left(-\frac{\tau}{T_1}\right) - \frac{(T_2 - E_1)(T_2 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_2 - T_3)} \exp\left(-\frac{\tau}{T_2}\right) + \frac{(T_3 - E_1)(T_3 - E_2)}{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)} \exp\left(-\frac{\tau}{T_3}\right) \right]. \quad (8)$$

Ниже даны выражения модулей, вещественных и мнимых частей комплексных спектральных плотностей, вычисленных по выражению (2) для функций (6)–(8):

для модели I:

$$|S(j\omega)| = \frac{U_m \cdot T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}};$$

$$\text{Re}(\omega) = \frac{U_m \cdot T}{1 + \omega^2 T^2};$$

$$\text{Im}(\omega) = -\frac{\omega U_m T^2}{1 + \omega^2 T^2}; \quad (9)$$

для модели II:

$$|S(j\omega)| = U_m \cdot \sqrt{\frac{(T_1 + T_2 - E)^2 + (\omega T_1 T_2)^2}{(1 + \omega^2 T_1^2)(1 + \omega^2 T_2^2)}};$$

$$\text{Re}(\omega) = \frac{U_m}{(T_1 - T_2)} \cdot \left[\frac{T_1(T_1 - E)}{\sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}} - \frac{T_2(T_2 - E)}{\sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} \right]; \quad (10)$$

$$\text{Im}(\omega) = \frac{U_m \omega}{(T_1 - T_2)} \cdot \left[\frac{T_2^2(T_2 - E)}{\sqrt{1 + \omega^2 T_2^2}} - \frac{T_1^2(T_1 - E)}{\sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}} \right];$$

для модели III:

$$|S(j\omega)| = U_m \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}, \quad (9)$$

где

$$\text{Re}(\omega) = \frac{T_1(T_1 - E_1)(T_1 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)(1 + \omega^2 T_1^2)} - \frac{T_2(T_2 - E_1)(T_2 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_2 - T_3)(1 + \omega^2 T_2^2)} + \frac{T_3(T_3 - E_1)(T_3 - E_2)}{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)(1 + \omega^2 T_3^2)};$$

$$\text{Im}(\omega) = \omega \left[\frac{T_1^2(E_1 - T_1)(T_1 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)(1 + \omega^2 T_1^2)} + \frac{T_2^2(T_2 - E_1)(T_2 - E_2)}{(T_1 - T_2)(T_2 - T_3)(1 + \omega^2 T_2^2)} + \frac{T_3^2(E_1 - T_1)(T_3 - E_2)}{(T_1 - T_3)(T_2 - T_3)(1 + \omega^2 T_3^2)} \right].$$

При сравнении модулей комплексных спектральных плотностей (9)–(11) сигнала $s(\tau)$ с соответствующими им переходными функциями (3)–(5) моделей ДТГ видно, что они содержат все параметры указанных динамических характеристик, т.е. доказана существующая однозначная связь между модулями комплексных спектральных плотностей (амплитудными спектрами) сформированных сигналов $s(\tau)$ и динамическими характеристиками исследуемых ДТГ.

При экспериментах сигнал $s(\tau)$ представлен не в виде непрерывной функции, а в виде дискретных отсчетов во времени, непосредственно к которым применить преобразование Фурье нельзя. Для получения амплитудного спектра дискретно заданного сигнала $s(\tau)$ можно использовать низкочастотные анализаторы спектра, программную среду *LabVIEW* для создания виртуального анализатора спектра и различные математические пакеты, к примеру *Mathcad*, *MatLab* и *Mathematica*, содержащие функции быстрого преобразования Фурье.

Для определения искомых динамических характеристик испытуемого ДТГ необходимо установить, какую часть амплитудного спектра или весь полученный амплитудный спектр можно использовать в последующих расчетах.

Поскольку существующие штатные ДТГ, используемых в авиационных газотурбинных двигателях, имеют в первом приближении постоянную времени T в диапазоне примерно от 1 до 3 с, то найдем амплитудные спектры их сигналов $s(\tau)$ для определения в них информативных частей.

Предположим, что спектральному анализу подверглись сигналы $s(\tau)$ с трех ДТГ, описываемых моделью I, у которых постоянные времени T равнялись соответственно 1, 2 и 3 с, а амплитуда $U_m = 100\%$.

На рисунке 4 представлены амплитудные спектры этих сигналов.

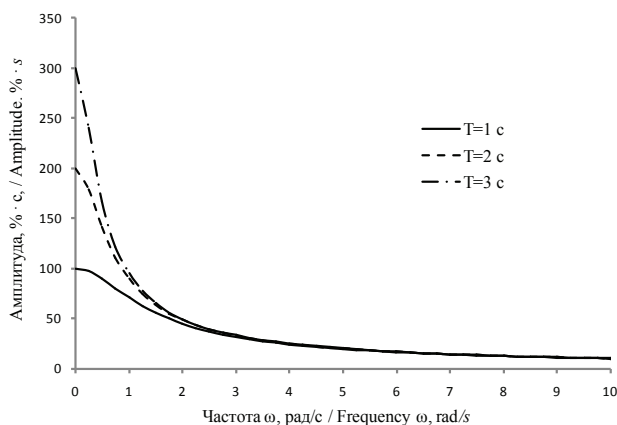


Рисунок 4 – Амплитудные спектры сигналов $s(\tau)$, соответствующих модели I с постоянными времени 1, 2 и 3 с

Figure 4 – Amplitude spectra of signals $s(\tau)$, corresponding to the model I with time constants 1, 2 and 3 s

Из рисунка 4 видно, что наибольшие различия в амплитудных спектрах рассматриваемых сигналов наблюдаются в низкочастотной части

спектра от 0 до 1 рад/с и, начиная примерно с частоты 3 рад/с, спектры сигналов практически совпадают. Из этого можно сделать вывод, что для штатных ДТГ основная информативная часть амплитудного спектра расположена в диапазоне частот до 1 рад/с и с гарантией может быть увеличена до 3 рад/с.

Предположим, что полезный сигнал $s(\tau)$ описывается выражением (6) с постоянной времени $T = 3$ с, амплитудой $U_m = 100\%$ и содержит наложенную помеху в виде трех гармонических сигналов с частотой 20, 25 и 30 рад/с с амплитудой 2 % от амплитуды полезного сигнала.

На рисунке 5 изображен рассматриваемый сигнал, а на рисунке 6 – его амплитудный спектр, полученный при использовании функции быстрого преобразования Фурье в *MatLab 2007b*.

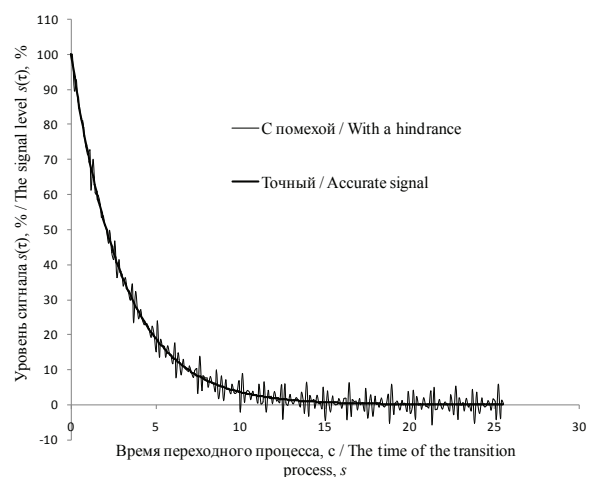


Рисунок 5 – Сигнал $s(\tau)$ с наложенными помехами

Figure 5 – Signal $s(\tau)$ with a hindrance

Из рисунков 5 и 6 видно, что, несмотря на высокий уровень помех в сигнале $s(\tau)$, информативная часть его амплитудного спектра практически не отреагировала на них. Сами же помехи расположились на соответствующих им частотах с соответствующими амплитудами.

Установление значений параметров (постоянных времени) выбранной модели ДТГ по информативной части амплитудного спектра может быть реализовано с помощью регрессионного анализа или путем использования встроенных процедур, имеющихся в различных системах обработки данных. Причем функциями регрессии являются выражения (9)–(11), соответствующие выбранным математическим моделям ДТГ. Так, например, в системе *STATISTICA* в модуле *Non-linear Estimation* («Нелинейное оценивание») в окне *User-specified regression* («Определяемая

пользователем регрессия») можно задать функцию искомого амплитудного спектра, при этом дискретные значения частот ω и экспериментальные значения амплитудного спектра удобно вводятся из файла исходных данных при обращении к кнопке *Variabies* («Переменные»).

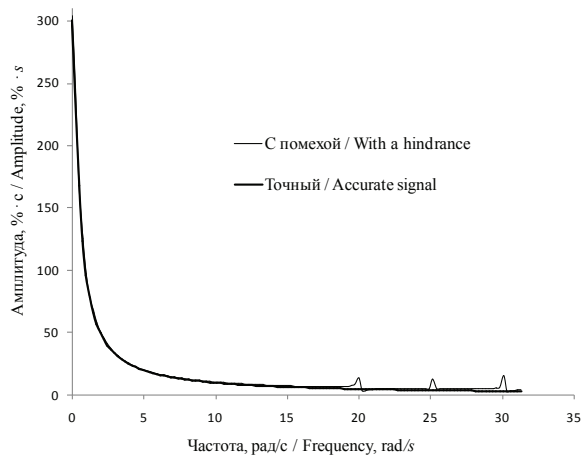


Рисунок 6 – Амплитудные спектры точного сигнала $s(\tau)$ и с наложенными помехами

Figure 6 – Amplitude spectra accurate signal $s(\tau)$ and amplitude spectra accurate signal $s(\tau)$ with a hindrance

Предлагаемый метод идентификации динамических характеристик датчиков температур обладает новизной и защищен патентом на изобретение [11].

Спектральный метод может быть также применен для определения динамических характеристик других позиционных средств измерений и технических объектов, у которых при испытаниях может быть зарегистрирована переходная характеристика, содержащая наложенные помехи.

Заключение

1. Разработан новый метод идентификации динамических характеристик датчиков температуры газов с применением спектрального анализа сигнала, сформированного по определенным правилам из экспериментальной переходной характеристики.

2. Предлагаемая область применения спектрального метода определения динамических характеристик:

- определение динамических характеристик средств измерений или технических объектов, которые могут быть отнесены к позиционным (с самовыравниванием) линейным аналоговым средствам с сосредоточенными параметрами;

- определение динамических характеристик средств измерений или технических объектов, у

которых эти характеристики могут быть установлены преимущественно по экспериментальным переходным характеристикам;

- определение динамических характеристик средств измерений или технических объектов по их регистрируемым переходным характеристикам, если они содержат помехи, существенно влияющие на точность результатов определения, и они находятся за пределами информативной части амплитудного спектра;

- использование амплитудного спектра для выбора или уточнения интервала дискретизации экспериментальных переходных характеристик.

3. К предполагаемым преимуществам спектрального метода определения динамических характеристик средств измерений можно отнести следующие:

- возможность определения и дальнейшего использования информативной части спектра сформированного сигнала $s(\tau)$, в котором сосредоточена основная информация о динамических свойствах испытуемых объектов;

- обнаружение и выделение помех, если они присутствуют в регистрируемых сигналах с испытуемых объектов, с целью их дальнейшего учета или устранения;

- возможность применения достаточно простых вычислительных программ для определения амплитудного спектра сформированного сигнала $s(\tau)$, если при этом он представлен в виде дискретных отсчетов.

Указанные преимущества позволят повысить точность определения динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов по экспериментальным переходным характеристикам.

Список использованных источников

1. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг ; пер. с англ.; под ред. Я.З. Цыпкина. – М. : Наука, 1991. – 432 с.

2. Мясникова, Н.В. Подходы к спектральному анализу в задачах идентификации динамических характеристик / Н.В. Мясникова, М.П. Строганов, М.П. Берестень, В.П. Иосифов // Приборы и системы управления. – 1992. – № 5. – С. 21–23.

3. Шербаков, М.А. Восстановление входного сигнала по результатам идентификации динамических характеристик средств измерений / М.А. Шербаков, В.П. Иосифов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 3–8.

4. Иосифов, В.П. Определение полных динамических характеристик средств измерений с применением рекуррентных процедур / В.П. Иосифов // Известия

высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 126–131.

5. Pao, G.P. Идентификация порядка и параметров непрерывных линейных систем при помощи функций Уолша / Г.П. Пао, Л. Сивакумар // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике / пер. с англ. – М. : Мир. – 1982. – Т. 70, № 7. – С. 89–91.

6. Froehlich, T. Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors / T. Froehlich, S. Augustin, C. Ament // International Journal of Thermophysics. – 2015. – Vol. 36, no. 8. – P. 2115–2123.

7. Вавиловская, С.Л. Автоматизация определения динамических и скоростных характеристик датчиков температуры на установке воздушной УВ-010 ЦИАМ / С.Л. Вавиловская, Д.Л. Захаров, М.В. Корнеев // Автоматизация в промышленности. – 2016. – Т. 4. – С. 28–29.

8. Грановский, В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 224 с.

9. Пат. РФ 2568972, МПК G 01 K 15/00. Устройство для определения динамических характеристик термодатчика / А.Ф. Сабитов, И.А. Сабитова; заявитель и патентообладатель Казан. нац. исслед. техн. ун-т. – № 2014130290/28; заявл. 22.07.2014; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 1 с.: ил.

10. Домрачева, Л.С. Синтез систем измерения нестационарных температур газовых потоков. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.

11. Пат. РФ 2568973, МПК G01K 15/00. Способ определения параметров затухающего переходного процесса термодатчика / А.Ф. Сабитов, И.А. Сабитова; заявитель и патентообладатель Казан. нац. исслед. техн. ун-т. – № 2014130291/28; заявл. 22.07.2014; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 1 с.: ил.

References

1. L'jung L. *Identifikaciya sistem. Teoriya dlia pol'zovatelja* [System Identification. Theory for the User]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 432 p.

2. Mjasnikova N.V., Stroganov M.P., Beresten' M.P., Iosifov V.P. [Approaches to spectral analysis in problems of identification of dynamic performance]. *Pribory i sistemy upravlenija*. [Devices and control systems], 1992, no. 5, pp. 21–23 (in Russian).

3. Sherbakov M.A., Iosifov V.P. [Restoration of the input signal based on the results of identification of dynamic characteristics of measuring instruments]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskiye nauki*. [Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science], 2007, no. 3, pp. 3–8 (in Russian).

4. Iosifov V.P. [Determination of the full dynamic characteristics of measuring instruments with the use of recurrent procedures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskiye nauki*. [Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science], 2011, no. 1 (17), pp. 126–131 (in Russian).

5. Pao G.P., Sivakumar L. [Order and Parameter Identification in Continuous Linear Systems via Walsh Functions]. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotehnike i radioelektronike (TIJeR)*. [Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers], 1982, vol. 70, no. 7, pp. 89–91 (in Russian).

6. Froehlich T., Augustin S., Ament C. Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors. *International Journal of Thermophysics*, 2015, vol. 36, no. 8, pp. 2115–2123.

7. Vavirovskaja S.L., Zaharov D.L., Korneev M.V. [Automation determination of dynamic and high-speed characteristics of temperature sensors in the installation of air УВ-010 CIAM]. *Avtomatizaciya v promyshlennosti* [Automation industry], 2016, vol. 04, pp. 28–29 (in Russian).

8. Granovskij V.A. *Dinamicheskiye izmereniya: Osnovy metrologicheskogo obespecheniya* [Dynamic measurements: Fundamentals of metrology software]. Leningrad, Energoatomisdat Publ., Leningrad. Deption, 1984, 224 p.

9. Sabitov A.F., Sabitova I.A. *Ustrojstvo dlia opredeleniya dinamicheskikh kharakteristik termodatchika* [The device for determining the dynamic characteristics of the temperature sensor]. Patent RF, no. 2568972, 2015.

10. Domracheva L.S. *Sintez sistem izmereniya nestacionarnykh temperatur gazovykh potokov* [Synthesis of unsteady temperature measurement system gas flow]. Moscow, Engineering Publ., 1987, 224 p.

11. Sabitov A.F., Sabitova I.A. *Sposob opredeleniya parametrov zatukhayushchego perekhodnogo processa termodatchika* [The method for determining the parameters of a damped transient thermal sensor]. Patent RF, no. 2568973, 2015.