

УДК 536.51:681.5.015.3

Реализация спектрального метода определения динамических характеристик средств измерений

А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина

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

Поступила 13.01.2020

Принята к печати 25.05.2020

Основным требованием спектрального метода определения динамических характеристик средств измерений (СИ) является установление амплитудного спектра сигнала в его информативной части, включающей значение амплитудного спектра на нулевой частоте. Существующие низкочастотные анализаторы спектра имеют рабочий диапазон частот, лежащий выше нулевой частоты, что приводит к погрешности определения динамических характеристик СИ спектральным методом. Целью данной работы являлась разработка программы вычисления амплитудного спектра сигналов, начиная от нулевой частоты, для реализации спектрального метода определения динамических характеристик СИ на компьютерах, оснащённых математическим пакетом *MatLab*.

Для реализации спектрального метода определения динамических характеристик средств измерений разработана программа в среде *MatLab 2013b*, позволяющая определять амплитудный спектр сигнала от нуля герц. В программе заложено считывание исходных данных из таблиц в формате *Excel* и представление вычисленного амплитудного спектра в виде диаграммы и таблицы отчётов.

Показано, что разработанная программа вычисляет амплитудный спектр сигналов со средним квадратическим отклонением не более 3,4 % на интервале частот от 0 до 10 рад/с. Вычисленный амплитудный спектр позволяет определять постоянную времени апериодических средств измерений первого порядка с погрешностью не более 0,166 % при любом уровне помех, если их частоты находятся за пределами информационной части спектра.

На примере высокочастотной помехи в переходной характеристике некоторых средств измерений продемонстрировано заявляемое преимущество спектрального метода определения динамических характеристик с использованием разработанной программы.

Ключевые слова: амплитудный спектр, динамические характеристики, средства измерений.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-155-162

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина.
Реализация спектрального метода определения динамических характеристик средств измерений.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 2. – С. 155–162.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-155-162

For citation:

A.F. Sabitov, I.A. Safina.
[Implementation of the Spectral Method for Determining of Measuring Instruments' Dynamic Characteristics].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 2, pp. 155–162 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-155-162

Implementation of the Spectral Method for Determining of Measuring Instruments' Dynamic Characteristics

A.F. Sabitov, I.A. Safina

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

Received 13.01.2020

Accepted for publication 25.05.2020

Abstract

The spectral method for establishing dynamic response of measuring instruments basically requires determining the amplitude spectrum of the signal in its informative part that includes the amplitude spectrum at zero frequency. The operating frequency range of existing low-frequency spectrum analyzers is above zero frequency that leads to an uncertainty in dynamic response of measuring instruments determined by the spectral method. The purpose of this paper is to develop a program for calculating the signal amplitude spectrum, starting from zero frequency, to implement a spectral method for determining the dynamic response of measuring instruments on computers equipped with the *MatLab* package.

To implement the spectral method for determining the dynamic response of measuring instruments, we developed a program in the *MatLab* 2013b environment that determines the signal amplitude spectrum from zero Hertz. The program reads the source data from *Excel* tables and presents the calculated amplitude spectrum as a chart and a report table.

It is shown that the developed program calculates the signal amplitude spectrum with a standard deviation of not more than 3.4 % in the frequency range of 0 to 10 rad/s. The calculated amplitude spectrum allows determining the time constant of first-order aperiodic measuring instruments with an uncertainty of not more than 0.166 % at any noise level, if their frequencies are outside the information part of the spectrum.

We demonstrated the claimed advantage of the spectral method for determining dynamic response using the developed program by the example of a high-frequency noise in the transient response of some measuring instruments.

Keywords: amplitude spectrum, dynamic characteristics, measuring instruments.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-155-162

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина.
Реализация спектрального метода определения динамических
характеристик средств измерений.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 2. – С. 155–162.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-155-162

For citation:

A.F. Sabitov, I.A. Safina.
[Implementation of the Spectral Method for Determining
of Measuring Instruments' Dynamic Characteristics].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 2, pp. 155–162 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-155-162

Введение

Несмотря на большое число известных методов определения динамических характеристик средств измерений продолжают работы по созданию новых и более совершенных алгоритмов и программ их определения [1–3].

Существует также достаточно большое число СИ, у которых динамические характеристики определяются исключительно или предпочтительно по экспериментальным переходным характеристикам. Примерами таких СИ являются погружаемые датчики температур жидких и газообразных потоков, у которых переходная характеристика регистрируется при перемещении из среды с одной температурой в подвижную среду с другой температурой [4–9]. При определении динамических характеристик по подобным экспериментальным переходным характеристикам возникают проблемы учёта содержащихся в них помех различной природы. Как известно, любая фильтрация помех с помощью различных методов и средств приводит к потере части полезного сигнала, что снижает точность определения динамических характеристик. Одним из методов определения динамических характеристик СИ по переходным характеристикам с помехами высокого уровня является спектральный метод, предложенный в работе [10]. Данный метод не направлен на уменьшение или подавление помех, а предлагает установить амплитудный спектр сигнала $s(\tau)$, сформированного из экспериментальной переходной характеристики СИ по приведённым в работе правилам. Определение же динамических характеристик предлагается производить по информативной части амплитудного спектра, лежащей в диапазоне частот от 0 рад/с до ω_b , где ω_b – верхняя частота информативной части. В работе [10] также показано, что если помехи даже высокого уровня находятся выше частоты ω_b , то они не оказывают существенного влияния на точность определения динамических характеристик СИ.

Для реализации спектрального метода требуется определить амплитудный спектр сигнала $s(\tau)$ в диапазоне частот от нуля герц (от нуля рад/с) и, по крайней мере, до ω_b . Как известно, амплитудные спектры сигналов можно определять с помощью соответствующих измерительных приборов – анализаторов спектра. Изучение существующих низкочастотных анализаторов спектра показало, их рабочий диапазон анали-

зируемых частот не начинается от нуля герц. Конкретное значение нижней границы рабочего диапазона анализируемых частот зависит от конкретного типа анализатора спектра и приводится в их технических характеристиках. Большинство низкочастотных анализаторов спектра имеют рабочий диапазон частот от 10 Гц. Небольшое число анализаторов спектра имеют более низкую границу диапазона частот. Так, например, у низкочастотного анализатора спектра типа *NF-XFR* фирмы *GOSSSEN-METRAWATT* нижнее значение частотного диапазона равно 1 Гц. Использование подобных анализаторов спектра приведёт к погрешности определения динамических характеристик СИ спектральным методом, величина которой будет зависеть от их конкретного рабочего диапазона анализируемых частот.

На рисунке 1 представлен пример, когда рабочий диапазон частот анализатора спектра начинается от 0,1 Гц (от 0,628 рад/с) и частично перекрывает информационную часть амплитудного спектра некоторого СИ, у которого $\omega_b = 3$ рад/с.

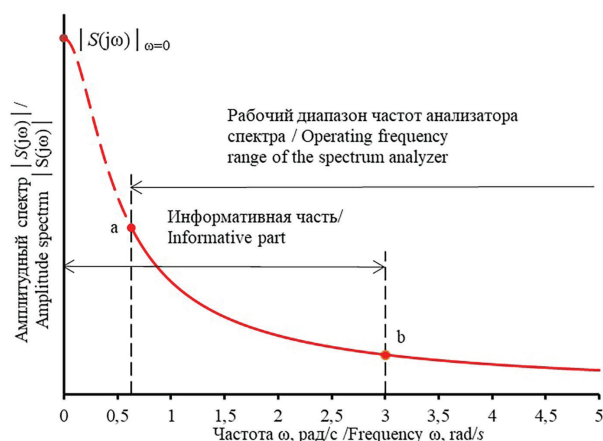


Рисунок 1 – Пример определения амплитудного спектра некоторого СИ анализатором спектра

Figure 1 – Example of determining the amplitude spectrum of a certain SI using spectrum analyzer

Как видно из рисунка 1, данный анализатор спектра определит амплитудный спектр в диапазоне частот, лежащих выше 0,628 рад/с. Таким образом, для определения динамических характеристик данного СИ спектральным методом доступен участок амплитудного спектра, лежащий между точками «а» и «б». Использование этого участка амплитудного спектра, а не всей информативной части, может привести к существенным погрешностям определения искомых динамических характеристик СИ. Следует отметить,

что величина амплитудного спектра на нулевой частоте имеет важное значение для реализации регрессионного анализа по определению искомым динамических характеристик СИ, поскольку она определяет постоянную составляющую анализируемого сигнала.

Как следует из работы [10], значения амплитудных спектров на нулевой частоте для первых трёх динамических моделей СИ имеют следующий вид:

– для модели 1:

$$|S(j\omega)|_{\omega=0} = U_m T;$$

– для модели 2:

$$|S(j\omega)|_{\omega=0} = U_m (T_1 + T_2 - E);$$

– для модели 3:

$$|S(j\omega)|_{\omega=0} = U_m (T_1 + T_2 + T_3 - E_1 - E_2),$$

где U_m – амплитуда сигнала $s(\tau)$ при $\tau = 0$ с; $T, T_1, T_2, T_3, E, E_1, E_2$ – постоянные времени моделей в секундах.

Таким образом, исследователям при используемых анализаторах спектра потребуется дополнительно оценивать влияние на точность определения динамических характеристик СИ спектральным методом результатов вычисления амплитудного спектра конкретными приборами.

Другим вариантом использования спектрального метода определения динамических характеристик СИ может быть применение вычислительных программ, лишённых указанного недостатка низкочастотных анализаторов спектра. Целью данной работы являлась разработка программы вычисления амплитудного спектра сигналов, начиная от нулевой частоты, для реализации спектрального метода определения динамических характеристик СИ на компьютерах, оснащённых математическим пакетом *MatLab*.

Основная часть

При разработке программы вычисления амплитудного спектра, необходимого для реализации спектрального метода определения динамических характеристик СИ, ставились следующие задачи:

– разработать программу в математическом пакете *MatLab*, доступном широкому кругу исследователей;

– создать достаточно точную вычислительную программу, обеспечивающую вычисление амплитудного спектра от 0 Гц;

– использовать исходную информацию об экспериментальной переходной характеристике, представленной в виде таблицы отсчётов «время – сигнал», в формате таблиц *Excel*;

– в процессе работы программы наблюдать графики исходного сигнала и амплитудного спектра;

– видеть числовые значения амплитудного спектра;

– сохранять полученные значения амплитудного спектра в формате таблиц *Excel*.

Реализация спектрального метода определения динамических характеристик СИ с привлечением вычислительной программы в математическом пакете *MatLab* содержит следующие основные процедуры.

1. Из экспериментальной переходной характеристики исследуемого СИ формируется дискретный сигнал $s(\tau)$, состоящий из N точек, по правилам, приведённым в работе [10]. При этом время дискретных отсчётов Δt должно удовлетворять практическому применению теоремы Котельникова.

2. Вычисляется быстрое преобразование Фурье $S(n)$ по N точкам с использованием функции *fft* в пакете *MatLab*.

3. Определяется верхняя граница времени T_{\max} дискретного сигнала $s(\tau)$.

4. Определяется нижняя граница времени T_{\min} дискретного сигнала $s(\tau)$. Для сигнала $s(\tau)$ $T_{\min} = 0$ с.

5. Вычисляется шаг частоты амплитудного спектра:

$$\Delta F = \frac{1}{T_{\max} - T_{\min}}, 1/\text{с}.$$

6. Определяется количество точек N_F на положительной частоте амплитудного спектра с использованием функции *length* в пакете *MatLab*.

7. Создаётся вектор частот F с шагом ΔF из N_F точек.

8. Производится пересчёт секундной частоты F в угловую частоту:

$$\omega = 2 \pi F, \text{ рад/с}.$$

9. Определяется количество частот M_F в преобразовании Фурье $S(n)$ с использованием функции *length* в пакете *MatLab*.

10. Рассчитывается корректирующий коэффициент:

$$k = \frac{1}{M_F \Delta F}, \text{ с.}$$

11. Выделяется из результатов преобразования амплитудный спектр $|S(j\omega)|$ с учётом корректирующего коэффициента k и использованием функции *abs* в пакете *MatLab*.

Разработанная программа позволила вычислять амплитудный спектр сигналов от 0 Гц за счёт включения в алгоритм новых процедур № 5 – № 11 по сравнению с известными программами.

Оценка точности вычисления амплитудного спектра разработанной программой произведена путём сравнения с идеальным спектром сигнала $s(\tau)$, который описывается следующим выражением:

$$|S(j\omega)|_{id} = \frac{U_m T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}. \quad (1)$$

Сигнал $s(\tau)$ соответствует преобразованной переходной характеристике некоторого СИ с передаточной функцией апериодического звена первого порядка и имеет вид:

$$s(\tau) = U_m e^{-\tau/T},$$

где $U_m = 100$ °С – амплитуда сигнала $s(\tau)$ при $\tau = 0$ с; $T = 3$ с – постоянная времени СИ.

В качестве оценки точности использовано относительное среднее квадратическое отклонение (СКО), рассчитанное по формуле:

$$\text{СКО} = 100 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{[|S(j\omega_i)|_{id} - |S(j\omega_i)|]^2}{|S(j\omega_i)|_{id}^2}}, \quad \%. \quad (2)$$

В работе [10] показано, что для СИ с постоянными времени от 1 до 3 с информативная часть амплитудного спектра находится примерно в диапазоне от 0 до 3 рад/с. Для оценки СКО использован диапазон частот амплитудного спектра с гарантией до 10 рад/с с числом отсчётов $N = 51$, при этом полученное значение СКО составило 3,4 %.

Для оценки точности определения динамических характеристик по амплитудным спектрам, полученным по разработанной программе, проведены исследования по двум моделям СИ, в переходных характеристиках которой содержатся помехи различного уровня с частотами, лежащими выше ω_b .

В качестве первой модели СИ выбрана его передаточная функция, соответствующая апериодическому звену первого порядка (модель 1), вида:

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1},$$

а в качестве второй модели – передаточная функция, соответствующая апериодическому звену второго порядка (модель 2):

$$W(p) = \frac{Ep + 1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где $T = 3$ с; $T_1 = 3$ с; $T_2 = 1$ с; $E = 2$ с – тестовые постоянные времени выбранных моделей.

Преобразованные переходные характеристики моделей с помехой рассматривались в следующем виде:

– для первой модели:

$$s(\tau) = U_m e^{-\frac{\tau}{T}} + f(\tau); \quad (2)$$

– для второй модели:

$$s(\tau) = U_m \left[\frac{T_1 - E}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\tau}{T_1}} - \frac{T_2 - E}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\tau}{T_2}} \right] + f(\tau),$$

где U_m – амплитуда сигнала $s(\tau)$ без помехи при $\tau = 0$ с; $f(\tau)$ – помеха в зарегистрированном сигнале.

Для реализации помехи, частоты которой лежали бы выше ω_b и уходили в бесконечность, использован пилообразный сигнал, который разлагается в следующий бесконечный гармонический ряд:

$$f(\tau) = \frac{2A}{\pi} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\tau\right) - \frac{1}{2}\sin\left(\frac{2 \cdot 2\pi}{\Theta}\tau\right) + \frac{1}{3}\sin\left(\frac{3 \cdot 2\pi}{\Theta}\tau\right) - \frac{1}{4}\sin\left(\frac{4 \cdot 2\pi}{\Theta}\tau\right) + \dots \right],$$

где A – амплитуда пилообразного сигнала; τ – период пилообразного сигнала, с.

Оценка точности определения динамических характеристик выбранных моделей СИ произведена при различной амплитуде A пилообразного сигнала, которая составила 0, 5, 10, 35, 40, 45, 50, 75 и 100 % от амплитуды U_m . Предположим, что выбранные модели СИ соответствуют передаточным функциям датчиков температуры, у которых $U_m = 100$ °С. Значение периода пилообразного сигнала выбрано равным 0,25 с, т. е. $\tau = 0,25$ с, что соответствует частоте первой гармоники ряда 25,12 рад/с (4 Гц).

Результаты определения постоянных времени моделей СИ по амплитудному спектру, вычис-

ленному по разработанной программе, приведены в таблице.

Таблица /Table

Результаты определения постоянных времени моделей по спектральному методу при наличии в переходной характеристике помехи и использовании информативной части амплитудного спектра от 0 до 3 рад/с

Results of determination of time constants of models on spectral method in the presence of interference in the transient response and use the informative part of the amplitude spectrum from 0 to 3 rad/s

A	0 %	5 %	10 %	35 %	40 %	45 %	50 %	75 %	100 %	$\delta_{\max}, \%$
T, c	3,005	3,005	3,005	3,005	3,005	3,005	3,005	3,005	3,005	0,166
T_1, c	3,019	3,019	3,019	3,021	3,022	3,022	3,023	3,025	3,026	0,867
T_2, c	1,021	1,022	1,022	1,023	1,024	1,024	1,024	1,026	1,027	2,700
E, c	2,035	2,036	2,036	2,040	2,041	2,041	2,042	2,045	2,049	2,045

Определение постоянных времени выбранных моделей по информативной части их амплитудного спектра произведено с привлечением регрессионного анализа, реализованного модулем *User-specified regression* в системе *STATISTICA*. При этом функцией регрессии для первой модели являлось следующее выражение:

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

для второй модели:

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

Из таблицы видно, что спектральный метод определяет постоянные времени модели практически одинаковыми независимо от уровней помехи. При этом значения установленных постоянных времени при различных уровнях помех отличаются от тестовых постоянных времени для первой модели с относительной погрешностью δ_{\max} не более чем на 0,166 %, а для второй модели – не более 2,7 %. Отличие установленных постоянных времени от тестовых объясняется погрешностью вычисления амплитудного спектра разработанной программой и погрешностью использованного регрессионного анализа.

На рисунке 2 для примера представлен сигнал вида (1) при $A = 0 \%$ и $A = 50 \%$, а на рисунке 3 – вычисленный амплитудный спектр этого сигнала при $A = 50 \%$.

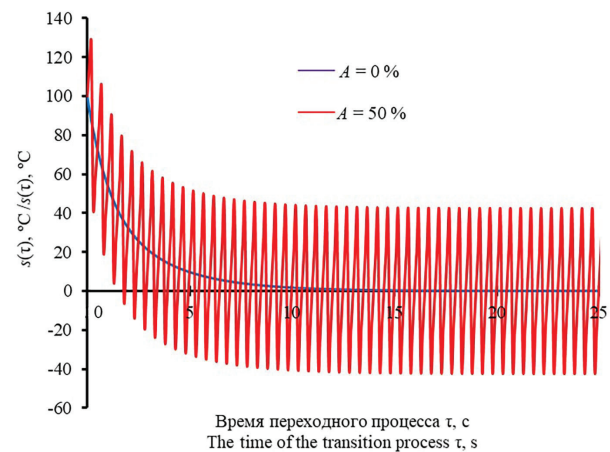


Рисунок 2 – Сигнал вида (1) при $A = 0 \%$ и $A = 50 \%$

Figure 2 – Signal of the form (1) at $A = 0 \%$ and $A = 50 \%$

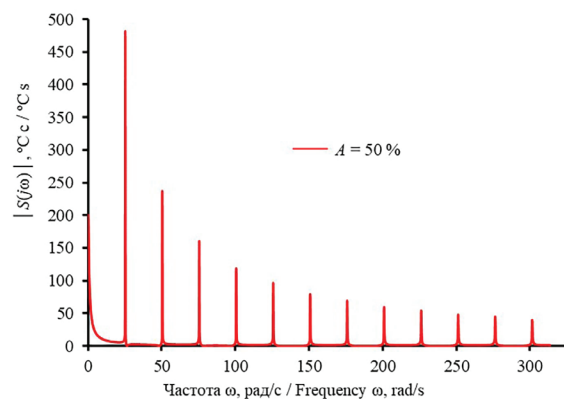


Рисунок 3 – Амплитудный спектр сигнала вида (1) при $A = 50 \%$

Figure 3 – Amplitude spectrum of the signal of the form (1) at $A = 50 \%$

Амплитудный спектр в диапазоне от 0 до 10 рад/с при $A = 50\%$ изображён на рисунке 4, где, для сравнения, изображён также график идеального амплитудного спектра без помехи, вычисленный по выражению (1).

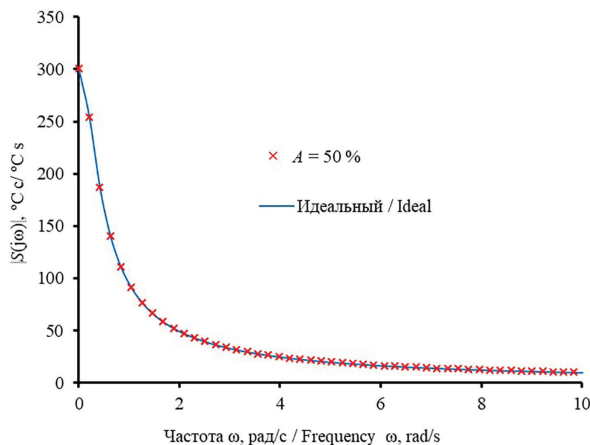


Рисунок 4 – Идеальный и вычисленный по программе амплитудные спектры сигнала $s(\tau)$ для первой модели

Figure 4 – Ideal and program-calculated amplitude spectra of signal $s(\tau)$ for the first model

Из рисунка 4 видно, что рассматриваемые амплитудные спектры практически совпадают на информативной части от 0 до 3 рад/с, что подтверждает выдвинутые в работе [10] рекомендации о её использовании для определения динамических характеристик СИ спектральным методом.

Заклучение

Исследования на конкретных примерах показали, что разработанная программа позволяет вычислять амплитудные спектры сигналов с достаточно высокой точностью. Так, например, для средств измерений с постоянной времени 3 с вычисленный амплитудный спектр в диапазоне частот от 0 до 10 рад/с отличается от идеального со средним квадратическим отклонением не более чем на 3,4 %.

Вычисленные по разработанной программе амплитудные спектры также позволяют определять динамические характеристики средств измерений с вполне удовлетворительной точностью. К примеру, погрешность определения постоянной времени средств измерений, описываемого апериодическим звеном первого порядка, не превышает 0,166 %.

Разработанная программа может быть реализована на компьютерах, оснащённых математическим пакетом *MatLab*. При этом информация о сигнале, преобразованном из экспериментальной переходной характеристики, считывается программой из таблиц в формате *Excel*, что также упрощает использование данной программы.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение точности вычисления амплитудного спектра разработанной программой, включающей более точный алгоритм регрессионного анализа для определения искомых динамических характеристик средств измерений.

Список использованных источников

1. Бекенева, Я.А. Динамические характеристики средств измерений промышленной автоматики / Я.А. Бекенева, В.А. Комшилова, К.О. Комшилова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 1. – С. 81–86.
2. Dubovitskii, V.F. Use of a data measurement system for studying the characteristics of temperature sensors / V.A. Dubovitskii, L.P. Sebina, M.V. Godunov, E.M. Maksimova // Fibre Chemistry. – 2011. – Vol. 42, no. 6. – P. 399–403. DOI: 10.1007/s10692-011-9297-0
3. 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.
4. Маршалов, Е.Д. Определение времени термической реакции термопреобразователей сопротивления / Е.Д. Маршалов, А.Н. Никоноров, И.К. Муравьев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 3. – С. 54–59.
5. 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.
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. DOI: 10.1007/s10765-015-1869-4
7. Jamroz, P. Relationship between dynamic coefficients of two temperature sensors under non stationary flow conditions / P. Jamroz // IEEE Sens. J. 2011. – Vol. 11, no. 1–2. – P. 335–340. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2073463
8. Zimmerschied, R. Nonlinear time constant estimation and dynamic compensation of temperature sensors / R. Zimmerschied, R. Isermann // Contr. Eng.

Pract. – 2010. – Vol. 18, no. 3. – P. 300–310.

DOI: 10.1016/j.conengrac.2009.11.008

9. Сафина, И.А. Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных датчиков температуры газовых потоков / И.А. Сафина, А.Ф. Сабитов, В.И. Гаркушенко // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 3. – С. 3–11.

10. Сабитов, А.Ф. Идентификация динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов / А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 7–14.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

References

1. Bekenova Y.A., Komshilova V.A., Komshilova K.O. [Dynamic characteristics of measurements systems based on industrial automation systems]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI"*, 2013, no. 1. pp. 81–86 (in Russian).

2. Dubovitskii V.F., Sebina L.P., Godunov M.V., Maksimova E.M. Use of a data measurement system for studying the characteristics of temperature sensors. *Fibre Chemistry*, 2011, vol. 42, no. 6, pp. 399–403.

DOI: 10.1007/s10692-011-9297-0

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

4. Marshalov E.D., Nikonorov A.N., Murav'ev I.K. [Determination of thermal reaction time of thermal

resistance converters]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo state power engineering University], 2017, no. 3, pp. 54–59 (in Russian).

5. 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]. *Avtomatizacia v promyshlennosti* [Automation industry], 2016, vol. 4, pp. 28–29 (in Russian).

6. Froehlich T., 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.

DOI: 10.1007/s10765-015-1869-4

7. Jamroz P. Relationship between dynamic coefficients of two temperature sensors under non stationary flow conditions. *IEEE Sens. J*, 2011, vol. 11, no. 1–2, pp. 335–340. **DOI:** 10.1109/JSEN.2010.2073463

8. Zimmerschied R., Isermann R. Nonlinear time constant estimation and dynamic compensation of temperature sensors. *Contr. Eng. Pract.*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 300–310.

DOI: 10.1016/j.conengrac.2009.11.008

9. Safina I.A., Sabitov A.F., Garkushenko V.I. [Identification of nominal dynamic characteristics gas temperature sensors of aircraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrument-making], 2017, no. 3, pp. 3–11 (in Russian).

10. Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of nominal dynamic characteristics gas temperature sensors]. *Pribory i metody izmerenii* [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