

УДК 536.51:681.5.015.3

Идентификация номинальных 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, г. Казань 420111, Россия

Поступила 09.11.2016

Принята к печати 01.02.2017

Для эффективной работы каналов регулирования температуры в системе автоматического управления работой авиационных газотурбинных двигателей необходимо настраивать устройства коррекции на номинальные динамические характеристики применяемых датчиков температуры газов с целью оптимального снижения их тепловой инерционности. Существующие методы и средства позволяют определять динамические характеристики только конкретных экземпляров датчиков температур или средние динамические характеристики по результатам испытаний ограниченного числа датчиков конкретного типа в воздушных потоках на аттестованных воздушных установках. Режимы эксплуатации авиационных датчиков температуры газов существенно отличаются от условий испытаний на воздушных установках, поэтому и динамические характеристики датчиков температуры в реальных условиях также будут существенно отличаться от полученных в результате испытаний. Целью работы являлась разработка методики пересчета результатов испытаний ограниченного числа датчиков температур в воздушных аттестованных установках на номинальные динамические характеристики датчиков конкретного типа в ожидаемых условиях эксплуатации.

Предложен алгоритм идентификации номинальных динамических характеристик датчиков, предназначенных для измерения температуры газов в авиационных газотурбинных двигателях. Алгоритм предусматривает регистрацию переходных характеристик отдельных экземпляров датчиков конкретного типа на аттестованных воздушных установках при заданных скоростях воздушного потока, вычисление коэффициентов теплообмена датчика с воздушным потоком при каждой скорости воздушного потока, определение средних переходных характеристик датчиков при каждой скорости воздушного потока, определение постоянных времени выбранной динамической модели датчика по средним переходным характеристикам датчиков и установление параметров гиперболической зависимости номинальных значений постоянных времени выбранной модели датчика от коэффициента теплообмена. В соответствии с ожидаемыми условиями эксплуатации датчиков вычисляют ожидаемый коэффициент теплообмена, с помощью которого по гиперболической зависимости определяют ожидаемые динамические характеристики датчиков конкретного типа.

Методика апробирована с использованием результатов испытаний опытных датчиков температуры газов на аттестованной воздушной установке. Установлены параметры гиперболических зависимостей номинальных значений постоянных времени для динамической модели второго порядка опытных датчиков. Установленные гиперболические зависимости охватывают как режимы испытаний опытных датчиков, так и ожидаемые условия их эксплуатации.

Разработанная методика позволяет прогнозировать номинальные динамические характеристики датчиков температуры газов конкретных типов в ожидаемых условиях эксплуатации по результатам испытаний ограниченного числа экземпляров датчиков в воздушном потоке на аттестованных установках.

Ключевые слова: идентификация, динамические характеристики, номинальные характеристики, датчики температуры газов.

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

Адрес для переписки:

Сабитов А.Ф.
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:

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

Для цитирования:

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.
Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 1. – С. 7–14.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

For citation:

Sabitov A.F., Safina I.A.
[Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors].
Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017, vol. 8, no. 1, pp. 7–14 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

Identification of nominal 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, Kazan 420111, Tatarstan, Russia*

Received 09.11.2016

Accepted for publication 01.02.2017

Abstract

The existing methods only allowed to determine the dynamic or average characteristics of specific copies of gas temperature sensors as the airflow test results of a limited number of specific copies of gas temperature sensors were carried out on a certified airflow equipment. The actual operating conditions of aircraft gas temperature sensors significantly differ from those at airflow equipment. The aim of the study was to develop methods of recalculation of a test results of a limited number of gas temperature sensors that were received at certified airflow equipment and to get nominal dynamic characteristics of a particular type of gas temperature sensors in the anticipated operating conditions.

This study offers the algorithm for the identification of the nominal dynamic characteristics of gas temperature sensors that are used to measure the temperature of gases in aircraft gas turbine engines. The algorithm makes it possible to 1) register the transient characteristics of gas temperature sensors of a particular type at a predetermined rate of air flow, 2) calculate the heat transfer coefficient between the gas temperature sensors and the air flow at each airflow rate, 3) measure the average transient characteristics of the gas temperature sensors at each airflow rate, 4) set the parameters of the hyperbolic function of the nominal variables of the time constants of selected gas temperature sensors from the heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient is calculated based on the expected operating conditions of the gas temperature sensors.

The result of the study was that the parameters of the hyperbolic function of the nominal variables of the time constants for the dynamic model of the second order gas temperature sensors were found. The developed method makes it possible to predict the dynamic performance of the specific types of gas temperature sensors in the expected operating conditions.

Keywords: identification, dynamic behavior, nominal characteristics, gas temperature sensors.

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

Адрес для переписки:

Сабитов А.Ф.
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:

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

Для цитирования:

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.
Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 1. – С. 7–14.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

For citation:

Sabitov A.F., Safina I.A.
[Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors].
Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017, vol. 8, no. 1, pp. 7–14 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

Введение

Современные летательные аппараты оснащены системами автоматического управления газотурбинными двигателями, содержащими каналы регулирования температуры газов перед турбиной, за турбиной или в форсажной камере при ее наличии. Первичными измерительными преобразователями температуры газов в этих каналах являются, как правило, термоэлектрические преобразователи (термопары), обладающие достаточно большой тепловой инерционностью. Для снижения их тепловой инерционности каналы регулирования температуры содержат устройства коррекции динамических характеристик применяемых типов датчиков температуры газов (ДТГ), настраиваемые на номинальные значения постоянных времени установленных передаточных функций ДТГ конкретного типа.

В соответствии с отраслевым стандартом¹ передаточные функции ДТГ, предназначенные для измерения температуры газовых и воздушных потоков в системах летательных аппаратов и силовых установок, в зависимости от точности описания их динамических свойств в нормативной документации должны быть представлены в виде:

$$W(p) = \frac{\prod_{j=1}^{l-1} (E_j p + 1)}{\prod_{i=1}^l (T_i p + 1)}, \quad (1)$$

где $l = 1, 2, 3$ – номер принятой математической модели датчика; T_i и E_j – постоянные времени соответствующей математической модели.

Если определены номинальные динамические характеристики ДТГ конкретного типа, то они снабжаются индексами sf .

Передаточные функции вида (1) конкретных экземпляров ДТГ определяются экспериментально на аттестованных воздушных установках, к примеру, типа УВ-010 [1], по их переходным характеристикам охлаждения в воздушном потоке известной скорости. Из числа зарубежных воздушных испытательных установок известна аналогичная воздушная многофункциональная исследовательская установка *Flow Test Facilities*, находящаяся в распоряжении *Rosemount Engineering Company* [2]. Имеются сведения, что во Франции на фирме *S.A. Auxitrol* также создана аэродинамическая установка для определения

динамических характеристик авиационных датчиков газовых потоков.

Проблема заключается в том, что для установления номинальных значений постоянных времени в выбранной математической модели (1) по результатам испытаний отдельных экземпляров ДТГ конкретного типа не существует общепризнанной методики. Такая методика должна была бы решить, каким образом по результатам испытаний на аттестованных воздушных установках ограниченного числа датчиков устанавливать номинальные значения постоянных времени выбранной динамической модели ДТГ конкретного типа, которые соответствуют:

а) режимам испытаний на данной воздушной установке;

в) ожидаемым режимам эксплуатации в авиационных ДТГ.

Новизной работы является предложение методики установления номинальных значений постоянных времени выбранной динамической модели ДТГ конкретного типа по результатам испытаний на аттестованных воздушных установках ограниченного числа датчиков.

На существующих испытательных воздушных установках скорость воздушного потока не превышает 300 м/с при статическом давлении близком к атмосферному и температуре 20–25 °С. Авиационные же ДТГ эксплуатируются в газовом потоке, являющимся продуктами сгорания керосина в воздухе, с температурой до 1300 °С и статическим давлением порядка 1 МПа. Поэтому, очевидно, задача пересчета результатов определения динамических характеристик ДТГ, полученных на воздушных установках, на динамические характеристики в ожидаемых условиях эксплуатации является достаточно актуальной.

В руководящем техническом материале авиационной техники² приводится следующая формула пересчета показателя тепловой инерции термометра при скорости и статическом давлении, отличных от скорости V_0 и статического давления p_{0CT} при испытаниях на воздушных установках:

$$\xi_1 = \xi_0 [(V_1 p_{1CT}) / (V_0 p_{0CT})]^{-z}, [c] \quad (2)$$

где ξ_1 – показатель тепловой инерции термометра при скорости V_1 и статическом давлении p_{0CT} ;

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

²РТМ 1595-79. Измерение нестационарной температуры воздушного потока при стендовых испытаниях ГТД. Термометры.

z – эмпирический коэффициент, устанавливаемый для каждого типа термометра.

В работе [3] приводится иная зависимость постоянной времени T_T датчика температуры в виде терморпары от изменения расхода обтекающего ее газа G_g :

$$T_T = T_{TP} (G_{gp} / G_g)^{0,5}, \quad (3)$$

где T_{TP} и G_{gp} – расчетные значения.

Из формул (2) и (3) видно, что они не учитывают температуру воздушного или газового потоков и применимы только для определения показателя тепловой инерции ДТГ, а не постоянных времени математических моделей вида (1) при $l \geq 2$.

Испытаниям на воздушных установках, подобных установке типа УВ-010, подвергается, как правило, ограниченное число опытных или вновь разрабатываемых ДТГ, по результатам которых требуется сделать вывод о номинальных динамических характеристиках ДТГ конкретного типа, соответствующих как испытательным режимам, так и ожидаемым условиям эксплуатации.

Известные методы статистической обработки результатов однократных или многократных испытаний отдельных изделий в выборке при равнооточных измерениях позволяют находить только среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов. При этом среднее арифметическое значение лишь приближается к номинальному значению при $n \rightarrow \infty$, а разница между полученным средним арифметическим значением и номинальным зависит от числа n и оценивается доверительной вероятностью.

В отечественных и зарубежных источниках не обнаружены методы определения номинальных динамических характеристик авиационных ДТГ как по результатам испытаний в воздушных установках, так и для ожидаемых условиях эксплуатации.

Целью данной работы являлась разработка методики определения номинальных динамических характеристик авиационных ДТГ в ожидаемых условиях эксплуатации по результатам испытаний ограниченного числа экземпляров датчиков в воздушных установках.

Основная часть

Известно, что динамические характеристики контактных датчиков температур зависят от условий теплообмена с измеряемой средой. Так, например, в [4, с. 46] есть информация о гипер-

болической зависимости показателя тепловой инерции $\varepsilon_{0,63}$ простейшего термоприемника от коэффициента теплообмена α с внешней (измеряемой) средой и использовании понятия характеристической кривой термической инерции. Характеристическую кривую показателя тепловой инерции тел или системы тел, по виду напоминающей гиперболу, в [4, с. 46] предложено описывать следующим выражением:

$$\varepsilon_{0,63} = \frac{C_\Sigma}{\alpha S} \cdot \frac{1}{\Psi_1}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{0,63}$ – показатель тепловой инерции тела или системы тел, с; C_Σ – теплоемкость системы, равная сумме теплоемкостей всех тел, входящих в систему, Дж/К; S – площадь поверхности теплообмена системы со средой, м²; Ψ_1 – критерий, характеризующий неравномерность распределения температур в теле (в системе тел).

В работе [4, с. 47] также отмечается, что гиперболы зависимости (4) одной из асимптот соответствует координатная ось $\varepsilon_{0,63}$, а другой – параллельная координатной оси α прямая $\varepsilon_{0,63} = \varepsilon_{0,63\infty}$, где $\varepsilon_{0,63\infty}$ – минимальное значение показателя тепловой инерции при $\alpha \rightarrow \infty$.

С учетом последнего замечания выражение (4) принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{0,63} = \frac{1}{\alpha \Psi} + \varepsilon_{0,63\infty}, \quad (5)$$

где Ψ – некоторый постоянный коэффициент для простейшего термоприемника, находящегося в стадии регулярного режима, при $\alpha = \text{const}$ и постоянной температуре измеряемой среды.

Простейшему термоприемнику соответствует передаточная функция вида (1) при $l = 1$, в которой к постоянной времени $T_1 = \varepsilon_{0,63}$ может быть применено выражение (5). Однако в литературе не обнаружено сведений о зависимостях всех постоянных времени T_i и E_j , входящих в передаточную функцию вида (1), от условий теплообмена для математических моделей ДТГ с $l \geq 2$.

Поскольку для использования в системах автоматического управления авиационных ДТГ необходимо знание номинальных динамических характеристик применяемых типов ДТГ в ожидаемых условиях эксплуатации, одним из направлений их прогнозирования может стать

предположение, что все постоянные времени, входящие в математическую модель (1), подчиняются выражениям вида (5) и могут быть приняты за номинальные значения. При этом задача сводится к установлению по результатам испытаний ограниченного числа отдельных экземпляров датчиков конкретного типа соответствующих коэффициентов и минимальных значений постоянных времени в выражениях:

$$T_{i\text{sf}}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \Psi_{T_i}} + T_{i\infty}; \quad E_{j\text{sf}}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \Psi_{E_j}} + E_{j\infty}. \quad (6)$$

Предлагаемый алгоритм идентификации номинальных динамических характеристик ДТГ конкретного типа изображен на рисунке 1 в виде блок-схемы.

Реализация предлагаемого алгоритма производится в следующей последовательности.

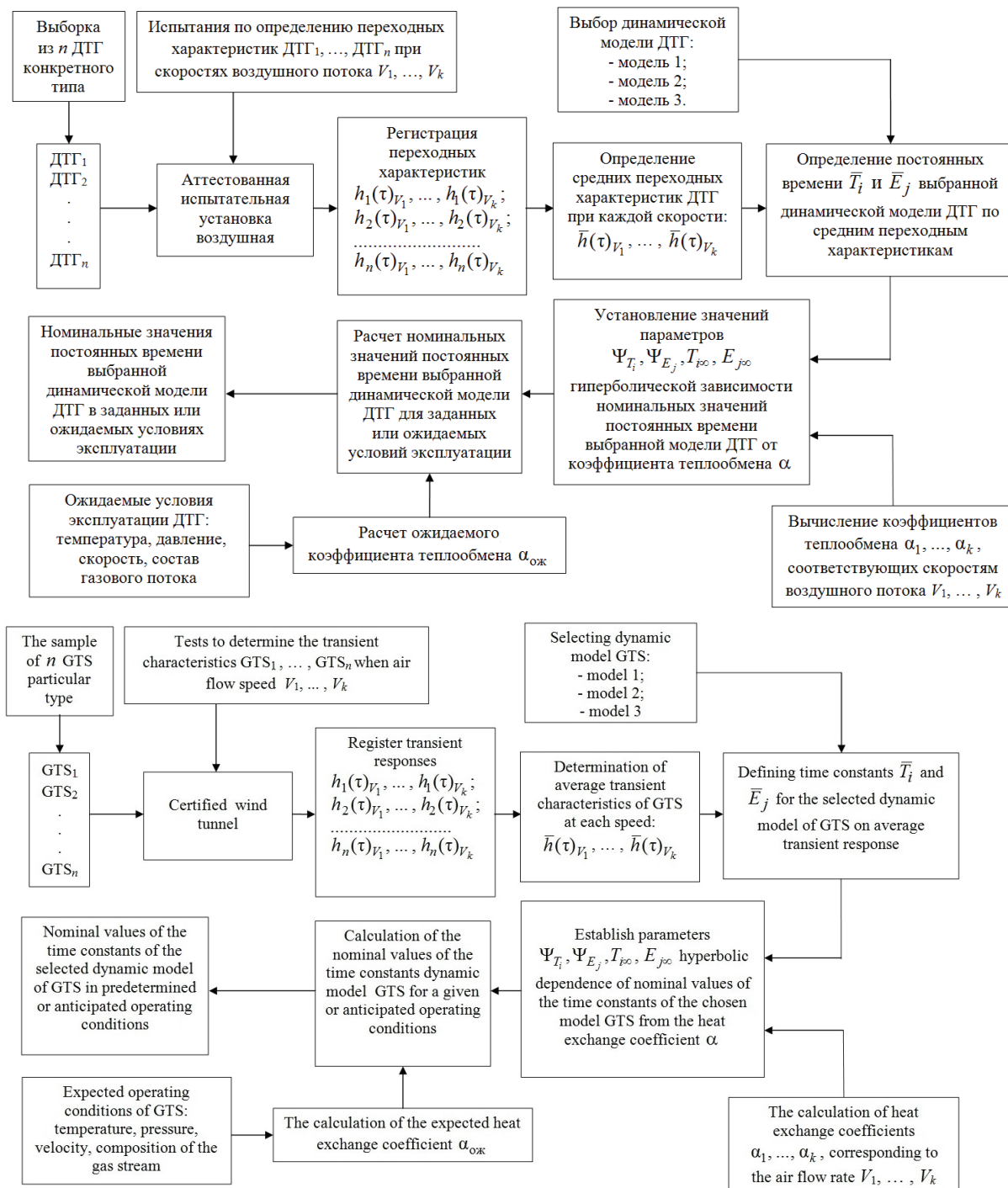


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма идентификации номинальных динамических характеристик датчиков температуры газов

Figure 1 – The flowchart identifying nominal dynamic characteristics gas temperature sensors

1. Формируется выборка их n образцов ДТГ конкретного типа. Объем выборки определяется имеющимся числом образцов ДТГ или устанавливается по заданной доверительной вероятности и допускаемой относительной погрешности определения искомых постоянных времени.

2. На аттестованной воздушной установке, например типа УВ-010 [1], с каждого экземпляра ДТГ регистрируется переходная характеристика при заданных скоростях V_1, \dots, V_k воздушного потока. Число значений скорости k желательно иметь не менее трех в диапазоне от 50 до 300 м/с.

4. Вычисляют коэффициенты теплообмена $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ чувствительного элемента ДТГ с воздушным потоком при каждой скорости воздушного потока.

5. Определяют средние переходные характеристики $\bar{h}(\tau)_{V_1}, \dots, \bar{h}(\tau)_{V_k}$ из переходных характеристик образцов ДТГ, зарегистрированных при одинаковой скорости воздушного потока. Если переходные характеристики образцов ДТГ представлены в виде дискретных отсчетов в определенные моменты времени переходного процесса, то значения средних переходных характеристик при одинаковой скорости воздушного потока в те же моменты времени определяются по формулам:

$$\bar{h}(\tau_1)_{V_m} = \frac{\sum_{v=1}^n h_v(\tau_1)_{V_m}}{n} :$$

$$\bar{h}(\tau_2)_{V_m} = \frac{\sum_{v=1}^n h_v(\tau_2)_{V_m}}{n} :$$

.....

$$\bar{h}(\tau_\mu)_{V_m} = \frac{\sum_{v=1}^n h_v(\tau_\mu)_{V_m}}{n} ,$$

где $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_\mu$ – моменты времени регистрации переходных характеристик образцов ДТГ; $m = 1, 2, \dots, k$ – номер скорости воздушного потока.

6. Используя какой-либо известный метод, например [5–8], определяют постоянные времени \bar{T}_i и \bar{E}_j выбранной динамической модели ДТГ по средним переходным характеристикам, соответствующим заданным скоростям воздушного потока.

7. С помощью регрессионного анализа проводят установление значений параметров $\Psi_T, \Psi_E, T_{i\infty}, E_{i\infty}$ гиперболической зависимости вида (6) номинальных значений постоянных времени выбранной модели ДТГ от коэффициента теплообмена α , используя полученные в п. 6 постоянные времени \bar{T}_i и \bar{E}_j и соответствующие им коэффициенты теплообмена $\alpha_1, \dots, \alpha_k$.

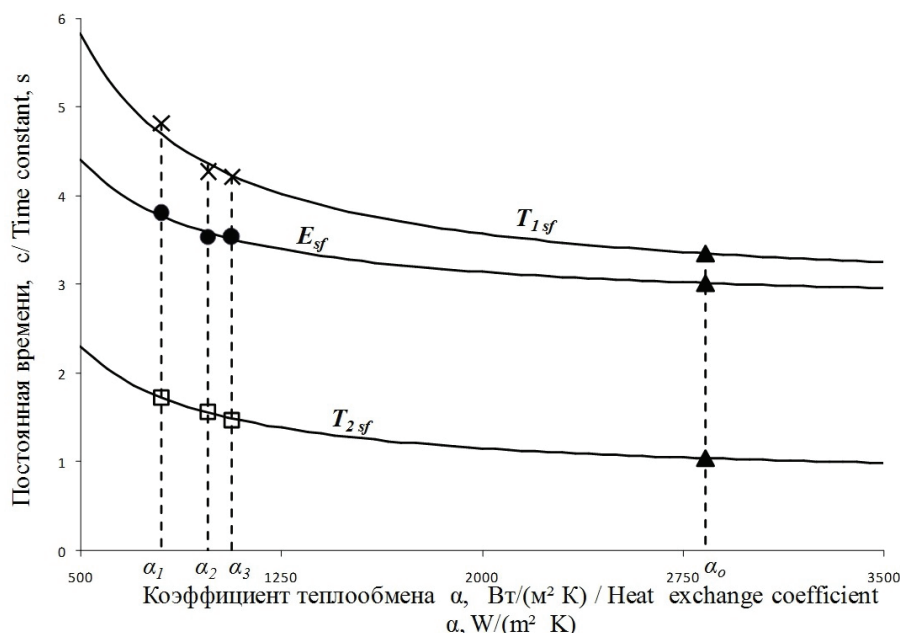


Рисунок 2 – Характеристические кривые номинальных постоянных времени модели 2 опытного датчика температуры газов: \times – \bar{T}_1 ; \bullet – \bar{E} ; \square – \bar{T}_2 ; \blacktriangle – номинальные значения постоянных времени при ожидаемом коэффициенте теплообмена $\alpha_{ок}$

Figure 2 – Characteristic curves of nominal time constants experienced gas temperature sensor (model 2): \times – \bar{T}_1 ; \bullet – \bar{E} ; \square – \bar{T}_2 ; \blacktriangle – nominal values of the time constants at the expected heat exchange coefficient $\alpha_{ок}$

8. На основании ожидаемых условий эксплуатации определяют ожидаемые коэффициенты теплообмена $\alpha_{\text{ок}}$ чувствительного элемента ДТГ с газовым потоком.

9. По установленным гиперболическим зависимостям определяют номинальные значения постоянных времени $T_{i, sf}$ и $E_{j, sf}$ выбранной модели ДТГ в ожидаемых условиях эксплуатации.

Предлагаемый алгоритм был использован для прогнозирования динамических характеристик некоторого опытного ДТГ термоэлектрического типа. Экспериментальные переходные характеристики с каждого образца регистрировались на аттестованной установке воздушной при скоростях воздушного потока 94, 130 и 150 м/с.

В таблице 1 приведены полученные при трех скоростях воздушного потока из средних переходных характеристик значения постоянных времени модели 2 опытного ДТГ и соответствующие указанным скоростям коэффициенты теплообмена. Постоянные времена определены с применением спектрального анализа, опубликованного в работах [9, 10].

Таблица 1 / Table 1

Постоянные времена опытного датчика температуры газов для модели 2
The values of the time constants of the model 2 experienced gas temperature sensors

k	$\bar{T}_{1, c}$	$\bar{T}_{2, c}$	\bar{E}, c	$V, \text{ м/с}$	$\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$
1	4,827	1,726	3,812	94	803,5
2	4,273	1,573	3,539	130	975,8
3	4,226	1,476	3,543	150	1 063,8

На рисунке 2 изображены полученные по предлагаемой методике характеристические кривые номинальных постоянных времени модели 2 опытного ДТГ и значения постоянных времени, соответствующие таблице 1.

Установленные гиперболические зависимости, описывающие характеристические кривые номинальных постоянных времени модели 2 опытного ДТГ, имеют вид:

$$T_{1, sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,000666} + 2,825071, [c]$$

$$T_{2, sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,001305} + 0,774012, [c]$$

$$E_{sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,001178} + 2,720597 \cdot [c]$$

В таблице 2 приведены полученные по установленным гиперболическим зависимостям ре-

зультирующие номинальные значения постоянных времени модели 2 опытного ДТГ при трех скоростях воздушного потока и соответствующих им коэффициентах теплообмена.

Таблица 2 / Table 2

Значения номинальных постоянных времени для модели 2 опытного датчика температуры газов
The values of the nominal time constants experienced gas temperature sensor (model 2)

k	$\bar{T}_{1, c}$, c	$\bar{T}_{2, c}$, c	\bar{E}_{sf}, c	$V, \text{ м/с}$	$\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$
1	4,693	1,727	3,777	94	803,5
2	4,363	1,559	3,590	130	975,8
3	4,236	1,494	3,518	150	1 063,8

В качестве ожидаемых условий эксплуатации опытного ДТГ выбран режим измерения температуры газового потока, являющегося продуктом сгорания керосина в атмосферном воздухе с коэффициентом избытка окислителя $\alpha_{\text{ок}} = 5$ при абсолютном давлении 0,53 МПа, температуре 1233 К и скорости 240 м/с. Ожидаемый коэффициент теплообмена газового потока с чувствительным элементом составил по расчетам $\alpha_{\text{ок}} = 2836 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, что дало по характеристическим кривым следующие ожидаемые значения номинальных постоянных времени опытного ДТГ: $T_{1, sf} = 3,355 \text{ с}$; $T_{2, sf} = 1,044 \text{ с}$; $E_{sf} = 3,020 \text{ с}$.

Одной из проверок правильности нахождения характеристических кривых по предлагаемой методике является выполнение следующих условий на всем диапазоне α :

– при $l = 2$ необходимо, чтобы $T_{1, sf} > E_{sf} > T_{2, sf}$ если $T_{1, sf} > T_{2, sf}$;

– при $l = 3$ необходимо, чтобы $T_{1, sf} > E_{1, sf} > T_{2, sf} > E_{2, sf} > T_{3, sf}$ если $T_{1, sf} > T_{2, sf} > T_{3, sf}$.

Как следует из рисунка 2 и таблицы 2, названные условия для номинальных постоянных времени модели 2 опытного датчика выполняются во всем диапазоне изменения коэффициента теплообмена α , что может служить основанием для доверия к полученным результатам.

Заключение

Разработана методика, позволяющая прогнозировать номинальные динамические характеристики датчиков температуры газов конкретных типов в ожидаемых условиях эксплуатации по результатам испытаний ограниченного числа экземпляров датчиков в воздушном потоке на аттестованных установках.

Точность получаемых результатов зависит от числа испытываемых датчиков, числа значений скорости воздушного потока, при которых проводят-

ся испытания, диапазона скоростей воздушного потока, используемых методик определения значений постоянных времени выбранных моделей датчиков температуры газов и точности вычисления коэффициентов теплообмена поверхности чувствительного элемента как с воздушным потоком при испытаниях, так и с газовым потоком в ожидаемых условиях.

Список использованных источников

1. 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.
2. Aeronautical research facilities // Heat Transfer Measurements. Temperature Measurement Application Data. – Bulletin 7619. – Appendix E. – 1975. – Rosemount Engineering Company.
3. Петунин, В.И. Помехоустойчивый самонастраивающийся измеритель температуры газа ГТД / В.И. Петунин, Р.Р. Сибатгаллин, А.И. Фрид // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 1 (67). – С. 147–155.
4. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н.А. Ярышев. – 2-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1990. – 254 с.
5. 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.
6. 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.
7. Рао, Г.П. Идентификация порядка и параметров непрерывных линейных систем при помощи функций Уолша / Г.П. Рао, Л. Сивакумар // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике / пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – Т. 70, № 7. – С. 89–91.
8. 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.
9. Патент 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.
10. Сабитов, А.Ф. Идентификация динамических характеристик авиационных датчиков темпера-

туры газов / А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина // Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 211–218. doi: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

References

1. 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]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation industry], 2016, vol. 04, pp. 28–29 (in Russian).
2. Aeronautical research facilities. *Heat Transfer Measurements. Temperature Measurement Application Data*, Bulletin 7619, Appendix E., 1975 Rosemount Engineering Company.
3. Petunin V.I., Sibagatullin R.R., Frid A.I. [Robust self-adjusting temperature of the gas meter GTD]. *Vestnik UGATU* [Vestnik Ufa State Aviation Technical University], 2015, vol. 19, no. 1 (67), pp. 147–155 (in Russian).
4. Yaryshev N.A. [Theoretical basis of measurement of unsteady temperature] *Teoreticheskie osnovy izmereniya nestatsionarnykh temperatur*. Energoatomisdat, Leningrad. Dep-tion, 1990, 254 p. (in Russian).
5. 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 zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science], 2007, no. 3, pp. 3–8 (in Russian).
6. Iosifov V.P. [Determination of the full dynamic characteristics of measuring instruments with the use of recurrent procedures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science], 2011, no. 1 (17), pp. 126–131 (in Russian).
7. Pao G.P., Sivakumar L. [Order and Parameter Identification in Continuous Linear Systems via Walsh Functions]. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike (TIJeR)* [Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers], 1982, vol. 70, no. 7, pp. 89–91 (in Russian).
8. 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.
9. Sabitov A.F., Sabitova I.A. *Sposob opredeleniya parametrov zatukhayushchego perekhodnogo protsessa termodatchika* [The method for determining the parameters of a damped transient thermal sensor]. Patent RF, no. 2568973, 2015.
10. Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of dynamic characteristics of aircraft 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