

УДК 621.452.3.01:621.362.1.001.3

С.В. ЕПИФАНОВ, А.А. ШПИЛЕВОЙ, С.И. СУХОВЕЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Исследована методика идентификации динамических характеристик термопары авиационного ГТД с учетом условий ее установки в проточной части. Подход включает теоретические исследования, обоснование выбора математической модели термопары, разработку программы для идентификации ее постоянной времени и анализ критериев качества идентификации. Получена модель, описывающая динамику термопары в диапазоне рабочих режимов двигателя. Подготовлена методическая основа для идентификации динамических характеристик термопар на других режимах работы двигателя, в частности – на режиме запуска.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, термопара, динамическая модель, постоянная времени, идентификация.

Введение

Одной из основных задач управления газотурбинными двигателями является ограничение значения температуры газов в турбине на всех режимах работы двигателя. Кроме того, на режиме запуска требуется ограничение скорости роста температуры.

Требования к точности выполнения этих ограничений высоки, так как их нарушение приводит к интенсивному расходованию ресурса деталей турбины. Основным фактором, влияющим на качество управления, в данном случае является точность определения текущих значений температуры. Эти значения определяются методом прямого измерения с помощью термопар. Штатные термопары изготовлены из проволоки большого диаметра, поэтому на переходных режимах работы двигателей имеют значительную динамическую погрешность. Для ее компенсации необходимо знать динамическую модель термопары, связывающую ее показания (регистрируемую температуру $T_{ТП}$) с фактическим значением температуры газа $T_{Г}$. Для термопар типа Т-80 или Т-148, используемых в ГТД, эта модель описывается уравнением

$$\varepsilon \frac{dT_{ТП}}{dt} + T_{ТП} = T_{Г}, \quad (1)$$

где ε – постоянная времени термопары.

Зависимость постоянной времени от режима работы двигателя представляется зависимостью [1]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(\frac{p_0 V_0}{pV} \right)^h, \quad (2)$$

где p, p_0 – текущее и базовое значения давления;

V, V_0 – текущее и базовое значения скорости;

ε_0 – базовое значение постоянной времени;

h – показатель степени ($h = 0,81$).

Модель термопары (1), (2) позволяет сформировать динамический корректор [2] – форсирующее звено, обеспечивающее косвенное определение текущей температуры по показаниям термопары.

Анализ работы систем автоматического управления (САУ), синтезированных с использованием модели термопары (1), (2), показал, что динамические свойства САУ на низких режимах работы двигателя могут оказаться неудовлетворительными из-за погрешностей указанного корректора.

Источник этих погрешностей можно определить, проведя анализ формулы (2): на низких режимах при $V \rightarrow 0$ значение $\varepsilon \rightarrow \infty$, в результате чего значения постоянной времени оказываются заниженными, а значения температуры на выходе корректора – завышенными.

Это обуславливает необходимость выполнения дополнительных исследований зависимости динамических характеристик термопар от условий работы ГТД.

1. Постановка задачи

Данное исследование выполнено с использованием результатов испытаний двухвального турбореактивного двухконтурного двигателя в диапазоне режимов от малого газа до максимального. Измерялась температура газа за турбиной. Рядом со штатными термопарами Т-148-2 (диаметр электродов 1,2 мм), были установлены кабельные термопары

(диаметр 0,3 мм). После запуска двигателя и выхода на режим малого газа выполнялись частичные прие- мистости с небольшим диапазоном изменения ре- жима, затем – сбросы в обратном порядке и останов. Частота регистрации показаний термопар - 100 Гц.

Таким образом, исходные данные для анализа представлены как набор зависимостей от времени показаний штатной T_{sht} и кабельной T_{kab} термопар.

Необходимо найти зависимость постоянной времени ε от режима работы двигателя. Поскольку параметры рабочего процесса p и V , входящие в формулу (2), связаны между собой условиями рабо- ты проточной части, они не могут рассматриваться как независимые переменные – аргументы модели. Кроме того, они не измеряются. Поэтому в качестве аргумента, представляющего режим работы двига- теля при определении постоянной времени, будем использовать частоту вращения ротора высокого давления:

$$\varepsilon = f(n_{ВД}) . \quad (3)$$

Тогда в общем виде рассматриваемая задача может быть представлена как задача параметриче- ской идентификации термопары с использованием

модели (1), (3), структура решения которой пред- ставлена на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема идентификации показаний термопары

2. Методика идентификации

Для реализации структуры, представленной на рис. 1, необходимо сформировать следующие эле- менты:

- структуру модели объекта;
- критерий качества модели;
- алгоритм коррекции параметров модели с целью улучшения ее качества.

Возможные варианты первых двух элементов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модели и критерии качества идентификации

Модель	$\varepsilon_{sht} \frac{dT_{sht}}{dt} + T_{sht} = T_{\Gamma}$	$\varepsilon_{sht} \frac{dT_{sht}}{dt} + T_{sht} = \varepsilon_{kab} \frac{dT_{kab}}{dt} + T_{kab}$
Критерии качества	$\Phi_3 = \int_{\tau_{нач}}^{\tau_{кон}} (T_{sht} - T_{sht.mod}^*)^2 dt$	$\Phi = \int_{\tau_{нач}}^{\tau_{кон}} (T_{sht} - T_{sht.mod})^2 dt$ $\Phi_1 = \int_{\tau_{нач}}^{\tau_{кон}} (T_{kab} - T_{kab.mod})^2 dt$ $\Phi_2 = \Phi + \Phi_1$

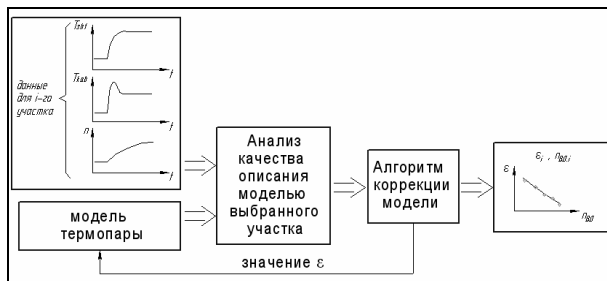


Рис. 2. Схема идентификации показаний термопары с автономным анализом участков

Простейшую структуру имеет модель (1) с по- стоянным коэффициентом, которую можно приме- нить к каждому участку эксперимента отдельно. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать

общую задачу, представленную на рис. 1, как после- довательность задач параметрической иденти- фикации для каждого i -го участка (переходного режима), с последующим использованием полученных значе- ний ε_i для формирования искомой зависимости $\varepsilon(n_{ВД})$. Соответствующая схема представлена на рис. 2.

3. Выбор расчетной модели

На первый взгляд, инерционность кабельной термопары существенно меньше, чем штатной, и ею можно пренебречь. Тогда показания кабельной тер- мопары можно использовать как истинные значения температуры газа, и справедлива модель

$$\varepsilon_{sht} \frac{dT_{sht}}{dt} + T_{sht} = T_{kab} \quad (4)$$

С другой стороны, исходя из того, что обе термопары расположены вместе в одной среде газового потока, можно приравнять левые части уравнений динамики обеих (штатной и кабельной) термопар:

$$\varepsilon_{sht} \frac{dT_{sht}}{dt} + T_{sht} = \varepsilon_{kab} \frac{dT_{kab}}{dt} + T_{kab} \quad (5)$$

Сформируем критерий качества модели на основе метода наименьших квадратов (МНК). Исходные данные однородны и не содержат выбросов, а характер распределения разброса значений показаний термопар близок к нормальному закону. Как известно, в этих условиях МНК является эффективным методом, то есть обеспечивает минимальный разброс оценок.

Для модели (4) критерий качества имеет вид

$$\Phi_3 = \int_{\tau_{нач}}^{\tau_{кон}} (T_{sht} - T_{sht.mod}^*)^2 dt, \quad (6)$$

где T_{sht} – значения, измеряемые штатной термопарой в каждый момент времени с заданной частотой;

$T_{sht.mod}^*$ – значения показаний штатной термопары, вычисленные путем подстановки T_{kab} в правую часть модели (4).

Критерий (6) является функцией одной переменной, которую легко визуализировать. Ее вид для данных, соответствующих переходу с $n_{ВД} = 19170$ об/мин до $n_{ВД} = 19580$ об/мин, представлен на рис. 3.

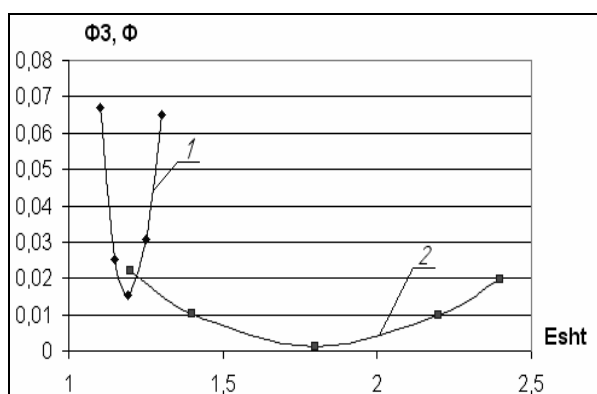


Рис. 3. Критерии качества моделей (4) и (5)

Значение ε_{sht}^* , соответствующее минимуму критерия, является МНК-оценкой постоянной времени штатной термопары.

Сделанное выше предположение о безынерци-

онности кабельной термопары требует проверки. Сформировать критерий качества модели, учитывающий инерционность кабельной термопары, можно на основе модели (5). В этой модели два неизвестных параметра, поэтому критерий качества модели штатной термопары преобразуется к виду

$$\Phi = \int_{\tau_{нач}}^{\tau_{кон}} (T_{sht} - T_{sht.mod})^2 dt, \quad (7)$$

где $T_{sht.mod}$ – значения показаний штатной термопары, вычисленные путем подстановки T_{kab} в правую часть модели (5).

Критерий Φ в виде линий уровня для рассматриваемого примера представлен на рис. 4, а сечение функции $\Phi(\varepsilon_{sht}, \varepsilon_{kab})$, проходящее через ее глобальный минимум – на рис. 3.

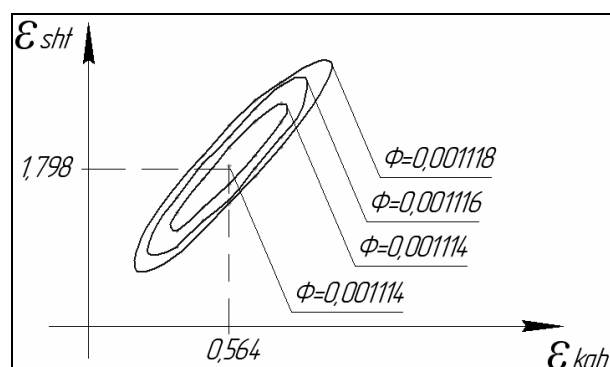


Рис. 4. Критерий качества Φ

Как видно из рис. 3, пренебрежение инерционностью кабельной термопары приводит к систематической погрешности оценивания ε_{sht} в сторону меньших значений. Поэтому в дальнейшем анализ выполнен с учетом инерционности кабельной термопары по модели (5).

4. Результаты расчетов

Расчеты производились в программной оболочке VisSim. Структура программы представлена на рис. 5.

Из общего набора имеющихся исходных данных (рис. 6) были рассмотрены этапы приемистости двигателя (участок II), на каждом из которых были выделены установившиеся и переходные режимы, обозначенные соответственно цифрами 1 и 2.

На каждом из установившихся и переходных режимов было произведено оценивание постоянных времени $\varepsilon_{sht}, \varepsilon_{kab}$ с помощью модели (5) и критерия Φ , результаты которого представлены в табл. 2 и на рис. 7.

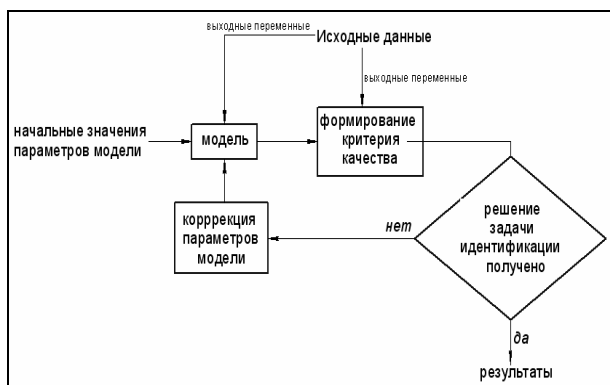


Рис. 5. Структура программы идентификации

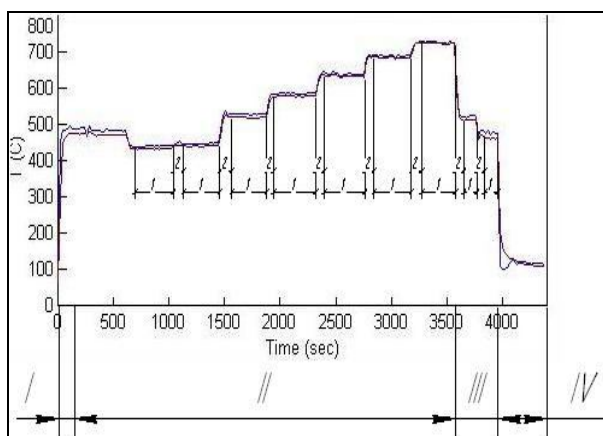


Рис. 6. Рабочий цикл двигателя при испытаниях

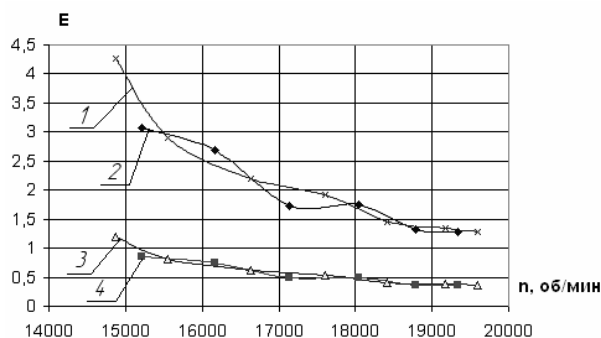


Рис. 7. Сводный график:

1, 2 – значения ϵ_{sht} на установившихся и переходных режимах; 3, 4 – значения ϵ_{kab} на установившихся и переходных режимах

Таблица 2

Результаты идентификации $\epsilon_{sht}, \epsilon_{kab}$ на этапах приемистости

Переходные режимы						
пВД	$\epsilon_{sht,n}$	$\epsilon_{kab,n}$	n	Φ_{min}	выборка	погрешность
15210	3,0716	0,8532	3,600094	3,7258	89,99	0,041
16160	2,678	0,744	3,599462	3,6354	60,7	0,06
17130	1,728	0,48	3,6	1,3728	50,08	0,027
18040	1,745	0,485	3,597938	1,2018	37,3	0,032
18790	1,3188	0,3663	3,600328	0,9575	33	0,029
19340	1,2822	0,3562	3,599663	0,4909	17,2	0,029
Установившиеся режимы						
пВД	$\epsilon_{sht,n}$	$\epsilon_{kab,n}$	n	Φ_{min}	выборка	погрешность
14870	4,2656	1,1849	3,599966	9,3117	313	0,03
15550	2,8944	0,804	3,6	5,318	187	0,028
16630	2,1957	0,6099	3,600098	8,79	266	0,033
17600	1,9228	0,534	3,600749	11,6782	329	0,035
18420	1,45	0,4033	3,595338	13,6029	373	0,036
19170	1,349	0,3748	3,599253	13,0979	351	0,037
19600	1,2825	0,3623	3,539884	10,805	286	0,038

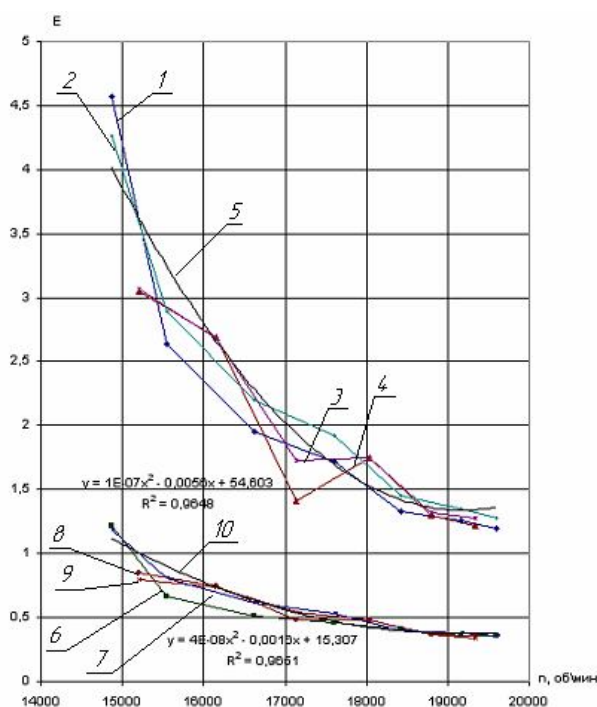


Рис. 8. Аппроксимационная модель:

1, 4 – значения ϵ_{sht} на установившихся и переходных режимах; 6, 9 – значения ϵ_{kab} на установившихся и переходных режимах; 2, 3 – значения ϵ_{sht} на установившихся и переходных режимах при идентификации с фиксированным значением $n = \epsilon_{sht} / \epsilon_{kab} = 3,6$; 7, 8 – значения ϵ_{kab} на установившихся и переходных режимах при идентификации с фиксированным значением $n = \epsilon_{sht} / \epsilon_{kab} = 3,6$; 5, 10 – линии тренда для $f = \epsilon_{sht}(n)$ и $f = \epsilon_{kab}(n)$

В завершение, согласно методике, представленной на рис. 2, при помощи программы Microsoft Excel была получена аппроксимационная модель (3).

Аппроксимация выполнена полиномами 2-го порядка. Их уравнения, а также значения выборочных дисперсий R^2 , представлены на рис. 8.

5. Сравнительный анализ критериев качества модели

Для сравнения результатов идентификации, получаемых по критериям Φ и Φ_1 , были выполнены дополнительные расчеты по критерию качества идентификации Φ_1 , представленные в табл. 3 и на рис. 9.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов идентификации по критериям Φ и Φ_1

Оценивание ε_{sht} с учетом невязки Φ_1

Переходные режимы

пВД	$\varepsilon_{\text{sht}_n}$	$\varepsilon_{\text{kab}_n}$	n	$\Phi_{1.\text{min}}$	выборка	погрешность
15210	3,0716	0,8532	3,600094	3,7258	89,99	0,041
16160	2,678	0,744	3,599462	3,6354	60,7	0,06
17130	1,728	0,48	3,6	1,3728	50,08	0,027
18040	1,745	0,485	3,597938	1,2018	37,3	0,032
18790	1,3188	0,3663	3,600328	0,9575	33	0,029
19340	1,2822	0,3562	3,599663	0,4909	17,2	0,029

Установившиеся режимы

пВД	$\varepsilon_{\text{sht}_y}$	$\varepsilon_{\text{kab}_y}$	n	$\Phi_{1.\text{min}}$	выборка	погрешность
14870	4,2656	1,1849	3,599966	9,3117	313	0,03
15550	2,8944	0,804	3,6	5,318	187	0,028
16630	2,1957	0,6099	3,600098	8,79	266	0,033
17600	1,9228	0,534	3,600749	11,6782	329	0,035
18420	1,45	0,4033	3,595338	13,6029	373	0,036
19170	1,349	0,3748	3,599253	13,0979	351	0,037
19600	1,2825	0,3623	3,539884	10,805	286	0,038

Оценивание ε_{kab} с учетом невязки Φ_2

Переходные режимы

пВД	$\varepsilon_{\text{sht}_n}$	$\varepsilon_{\text{kab}_n}$	n	$\Phi_{2.\text{min}}$	выборка	погрешность
15210	3,82164	1,06157	3,599989	270,644	89,99	3,007
17130	1,5855	0,440418	3,599989	284,981	50,08	5,691
19340	1,19155	0,330985	3,600012	284,75	17,2	16,555

Установившиеся режимы

пВД	$\varepsilon_{\text{sht}_y}$	$\varepsilon_{\text{kab}_y}$	n	$\Phi_{2.\text{min}}$	выборка	погрешность
14870	2,91587	0,809964	3,6	84,9617	313	0,271
17600	1,23269	0,342414	3,599999	50,6073	329	0,154
19600	1,26786	0,352182	3,600014	16,2785	286	0,057

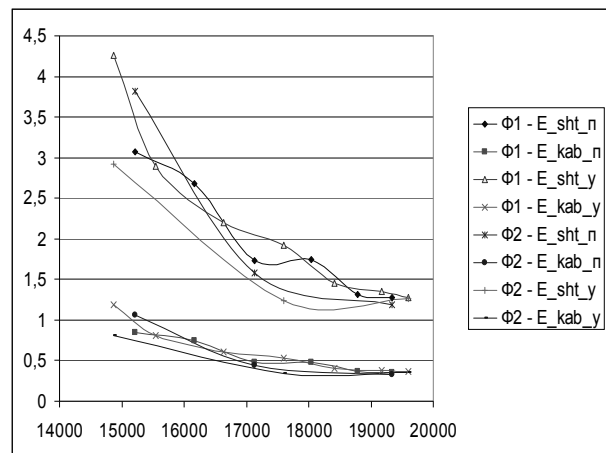


Рис. 9. Сравнение результатов оценивания по критериям Φ и Φ_1

Был также произведен расчет по критерию качества Φ_2 . В результате установлено, что при его прямом использовании он не дает новых результатов по отношению к критерию Φ_1 . Это можно объяснить тем, что он описывается формулой

$$\Phi_2 = \Phi + \Phi_1, \quad (8)$$

а, как видно из табл. 3, минимальное значение критерия Φ_1 отличается от соответствующего значения критерия Φ на несколько порядков, что полностью исключает влияние слагаемого Φ на результаты оценивания.

Этот недостаток можно устранить, если в уравнение (8) ввести весовые коэффициенты, учитывающие разброс показаний штатной и кабельной термопар:

$$\Phi_2 = \frac{\Phi}{\sigma_{\text{sht}}^2} + \frac{\Phi_1}{\sigma_{\text{kab}}^2}; \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{sht}} = \sqrt{\frac{\Phi_{\text{min}}}{n-1}}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{kab}} = \sqrt{\frac{\Phi_{1.\text{min}}}{n-1}}.$$

где σ – среднеквадратическое отклонение, n – количество измерений.

Заключение

Предложена и опробована методика, позволяющая определять постоянную времени термопары, выполнен анализ выбора модели и критерия качества идентификации.

Анализ полученных результатов свидетельствуют о корректности сформированной модели и выбора методики идентификации.

Разработанное методическое и программное обеспечение позволяет идентифицировать динамические характеристики термопар и на других этапах рабочего цикла двигателя, в том числе и на этапе запуска.

Целесообразно продолжить данное исследование в направлении сравнения результатов оценивания, полученных на установившихся и переходных режимах работы двигателя, на режимах приемистости и сброса, а также на переходных режимах с малым и значительным изменением условий работы двигателя.

Литература

1. Шевяков А.А. Системы автоматического управления авиационными воздушно-реактивными силовыми установками: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Авиационные двигатели и силовые установки» / А.А. Шевяков. – М.: Машиностроение, 1992. – 432 с.

2. Сняков А.Н. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками: учебник для студентов высших технических учебных заведений / А.Н. Сняков, Ф.А. Шаймарданов. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.

Поступила в редакцию 15.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр. Б.И. Кузнецов, Институт электричества и магнетизма НАН Украины, Украина.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБОВУВАННЯ ДВИГУНІВ

С.В. Єпіфанов, О.О. Шпилевий, С.І. Суховій

Досліджено методику ідентифікації динамічних характеристик термопари авіаційного ГТД з урахуванням умов її розташування в проточній частині. Підхід містить теоретичні дослідження, обґрунтування вибору математичної моделі термопари, розробку програми для ідентифікації її постійної часу та аналіз критеріїв якості ідентифікації. Сформовано модель, яка описує динаміку термопари в діапазоні робочих режимів двигуна. Підготовлено методичну основу для ідентифікації динамічних характеристик термопар на інших режимах роботи двигуна, зокрема – на режимі запуску.

Ключові слова: газотурбинний двигатель, термопара, динамическая модель, постоянная времени, идентификация.

IDENTIFICATION DYNAMIC CHARACTERISTICS TERMOCOUPLES BY RESULTS OF ENGINE TESTS

S.V. Yepifanov, O.O. Shpylovi, S.I. Suchovi

Method of the thermocouple identification for gas turbine taking into account its position in a gas path is investigated. The presented approach includes theoretical analysis, mathematic model choice, identification method development for estimation of thermocouple time-factor and identification quality criteria analysis. Model which describes dynamics of thermocouple in operation diapason has been developed. Methodic base for identification of dynamic performances of thermocouples on other operation modes including starting has been prepared.

Key words: turbine engine, thermocouple, dynamic model, time-factor, identification.

Епіфанов Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Шпилевий Алексей Александрович – студент 5 курса факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Суховой Сергей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.