

УДК 629.7.018.4.054

В.Н. НИКОЛАЕВ¹, Ю.Н. КАБАНОВ²¹ ФГУП «Сибирский НИИ авиации им. С.А. Чаплыгина», Новосибирск, Россия² ФГУП «НИИ электронных приборов», Новосибирск, Россия**ТЕРМОКОНВЕКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ ДВИГАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Разработан преобразователь расхода и температуры жидкости в трубопроводах двигателя летательного аппарата. Для повышения быстродействия и снижения чувствительности к изменению теплопроводности стенок трубопроводов был использован термokonвективный метод постоянной температуры. Задача по оптимизации параметров первичного преобразователя была решена с использованием алгоритма Хука-Дживса. Определение характеристик вторичного преобразователя проводилось экспериментально-теоретическим методом по алгоритму композиции методов наискорейшего спуска, квазиьютоновского и координатного. В квазиьютоновском методе оценка матрицы Гессе вторых частных производных проводится по формуле Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шэнно. Определение погрешностей оценок параметров преобразователя выполнялось по методу, основанному на построении и анализе ковариационной матрицы погрешностей оценок.

Ключевые слова: математическая модель, преобразователь расхода и температуры, термokonвективный метод, термопреобразователь, трубопровод, параметрическая идентификация, погрешность параметрической идентификации.

Введение

Исследование и диагностирование технического состояния гидросистемы или топливной системы двигателя летательного аппарата требует использования результатов измерений расхода и температуры жидкости в трубопроводах. Эти параметры изменяются в широких пределах, а процессы их изменения являются нестационарными.

По совокупности предъявляемых требований к преобразователям расхода и температуры наиболее целесообразно использовать термokonвективный метод постоянной температуры. При использовании этого метода необходимо решить проблемы повышения быстродействия и снижения чувствительности к изменению теплопроводности стенок трубопроводов.

В данной работе рассматриваются вопросы оптимального синтеза измерительной системы, включающей первичный и вторичный преобразователи жидкости в трубопроводах, которые способствуют решению этих проблем.

При исследовании погрешности термokonвективного преобразователя от изменения толщины стенки трубопровода l_{tb} и коэффициента теплопроводности λ_{tb} нами определена зависимость методической погрешности от взаимного положения нагревателя и термопреобразователей (рис. 1). Это позволило путём оптимального расположения элементов первичного преобразователя значительно снизить

методическую погрешность измерения расхода при изменении теплопроводности стенок трубопровода. Эта погрешность определяется величиной $l_{tb} \lambda_{tb}$.

1. Первичный преобразователь расхода

Для оценивания погрешности воспользуемся описанием процесса теплообмена трубопровода с первичным преобразователем, приняв допущения о неизменности температуры стенки в сечении трубопровода, незначительности нагрева жидкости, постоянстве по длине трубопровода коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности, отсутствии потерь в окружающую трубопровод среду:

$$\lambda_{tb} l_{tb} \frac{d^2(T_{tb} - T_{lq})}{dx^2} + q(x) = \alpha_{tb}(T_{tb} - T_{lq}), \quad (1)$$

где T_{tb} – температура поверхности трубопровода; T_{lq} – температура жидкости в трубопроводе; α_{tb} – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности трубопровода; $q(x)$ – поверхностная плотность теплового потока от нагревателя.

Решение уравнения (1) при расстоянии термопреобразователя от нагревателя x больше полуширины L кольцевого нагревателя может быть записано в виде:

$$T_{tb} - T_{lq} = \frac{q}{2\lambda_{tb} l_{tb} m^2} (e^{mL} - e^{-mL}) e^{-mx}, \quad (2)$$

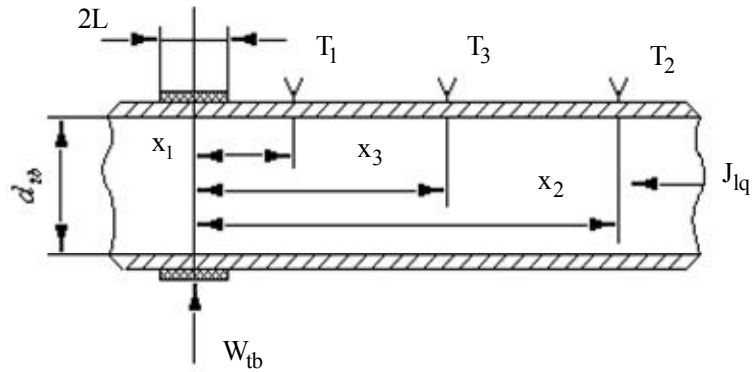


Рис. 1. Схема первичного термоконвективного преобразователя расхода и температуры: x_1, x_2, x_3 – расстояния термопреобразователей 1, 2, 3 от нагревателя; T_1, T_2, T_3 – температуры термопреобразователей; W_{tb} – мощность нагревателя; J_{lq} – массовая скорость жидкости; L – полуширины кольцевого нагревателя; d_{tb} – диаметр трубопровода

где
$$m = \sqrt{\frac{\alpha_{tb}}{\lambda_{tb} l_{tb}}}; \quad (3)$$

$$q = \frac{W_{tb}}{2\pi d_{tb} L}; \quad (4)$$

$$\alpha_{tb} = \frac{0,023 J_{lq}^{0,8} Pr^{0,4} \lambda_{lq}}{\mu_{lq}^{0,8} d_{tb}^{0,2}}. \quad (5)$$

В выражениях (3) – (5) введены следующие обозначения: W_{tb} – мощность нагревателя; d_{tb} – диаметр трубопровода; J_{lq} – массовая скорость жидкости в трубопроводе; Pr – число Прандтля; λ_{lq} – коэффициент теплопроводности жидкости; μ_{lq} – динамическая вязкость жидкости.

В установившемся режиме для термоконвективного расходомера соблюдается условие

$$T_1 - T_2 = \text{const}, \quad T_2 = T_{lq}, \quad (6)$$

где T_1, T_2 – температура 1, 2 термопреобразователей соответственно.

Используя выражения (2) – (5), получим зависимость теплового потока на внутренней поверхности трубопровода $W_{tb} = W_{tb}(J_{lq})$ для различных расстояний от нагревателя термопреобразователя с температурой T_1 и различных коэффициентов теплопроводности и толщины трубопровода. Анализ номограммы W_{tb} от J_{lq} для трубопровода диаметром $d_{tb} = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $L = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $T_{tb} - T_{lq} = 5$ К показал, что путём подбора расстояния x_1 расстояния термопреобразователя 1 от нагревателя можно значительно снизить их разброс в узком диапазоне изменения J_{lq} . Причём увеличение расстояния x_1 , обеспечивающее в установившемся режиме мини-

мальный разброс $W_{tb}(J_{lq})$, приводит к значительному увеличению времени переходных процессов в системе нагреватель – термопреобразователь.

Данное противоречие можно устранить, используя дополнительный термопреобразователь, размещаемый между преобразователями T_1 и T_2 , и обеспечивая в установившемся режиме условие

$$\Delta_{1,2} + k_3 \Delta_{3,2} = \Delta T_{set} = \text{const}, \quad (7)$$

где $\Delta_{1,2}, \Delta_{3,2}$ – разность температур, соответственно, термопреобразователей 1, 3 с температурой преобразователя 2; ΔT_{set} – заданная избыточная температура; k_3 – постоянный коэффициент.

Зависимость $W_{tb}(J_{lq})$ была получена путём подстановки выражения (2) для преобразователей с температурами T_1, T_2 в уравнение (7). С целью упрощения уравнений в дальнейшем будем пользоваться зависимостью $W_{tb}(\alpha_{tb})$ в виде

$$W_{tb}(\alpha_{tb}) = \frac{4\pi d_{tb} L \lambda_{tb} l_{tb} m^2 \Delta T_{set}}{(e^{mL} - e^{-mL})(e^{-mx_1} + k_3 e^{-mx_3})}. \quad (8)$$

Оптимизацией координат размещения x_1, x_3 термопреобразователей 1, 3 и коэффициента k_3 для постоянных значений коэффициента теплоотдачи α_{tb} можно исключить погрешность от изменения теплопроводности трубопровода. В качестве критерия оптимизации значений x_1, x_3, k_3 используем выражение

$$\min \Phi(\alpha_{tb}) = \left(\frac{W_1(\alpha_{tb})}{W_0(\alpha_{tb})} - 1 \right)^2 + \left(\frac{W_3(\alpha_{tb})}{W_0(\alpha_{tb})} - 1 \right)^2, \quad (9)$$

где $W_0(\alpha_{tb})$ – значение мощности нагревателя, соответствующее $(\lambda_{tb} l_{tb})_0 = 0,5$ Вт/К и используемо-

го в качестве градуировочного; $W_1(\alpha_{tb})$, $W_3(\alpha_{tb})$ – значения мощностей нагревателя, соответствующие $(\lambda_{tb} l_{tb})_1 = 5 \cdot 10^{-2}$ Вт/К и $(\lambda_{tb} l_{tb})_3 = 0,2$ Вт/К.

Задача минимизации функционала (9) в пространстве параметров x_1 , x_3 и k_3 была решена с использованием алгоритма Хука-Дживса [1].

Для определения зависимости оптимальных значений x_1 , x_3 и k_3 от коэффициентов теплоотдачи α_{tb} коэффициент α_{tb} определяется по формуле

$$\alpha_{tb} = 1250(J_{lq} F_{tb})^{0,8}, \quad (10)$$

где F_{tb} – площадь сечения трубопровода.

Полученные результаты не дают возможности полного исключения влияния изменения теплопроводности трубопровода в рассматриваемых диапазонах изменения α_{tb} и $\lambda_{tb} l_{tb}$.

Практический интерес представляет случай постоянства x_1 , x_3 и k_3 во всём диапазоне измеряемого расхода. Причём с целью снижения времени переходных процессов в системе нагреватель – термопреобразователи с температурой T_1 и T_3 желательно иметь минимальные значения координат x_1 и x_3 .

При минимально возможном для рассматриваемого первичного преобразователя значения $x_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м параметры x_3 и k_3 имеют следующие оптимальные величины $x_3 = 9 \cdot 10^{-2}$ м и $k_3 = 4,7$ для коэффициента теплоотдачи $\alpha_{tb} = 35 - 200$ Вт/(м²·К).

Границы разброса $W_{tb}(\alpha_{tb})$ в зависимости от произведения теплопроводности и толщины трубопровода $(\lambda_{tb} l_{tb})_0 = 0,137$ Вт/К; $(\lambda_{tb} l_{tb})_1 = 0,1$ Вт/К; $(\lambda_{tb} l_{tb})_3 = 0,175$ Вт/К при значениях $x_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м; $x_3 = 9 \cdot 10^{-2}$ м и $k_3 = 4,7$ незначительны.

Диапазон изменения теплопроводности трубопровода выбран с учётом реального разброса характеристик λ_{tb} и l_{tb} для трубопровода из алюминиевого сплава с $l_{tb} = 1 \cdot 10^{-3}$ м.

2. Вторичный преобразователь расхода

Вторичный преобразователь расхода представляет собой систему автоматического регулирования температуры трубопровода в определённых его сечениях, осуществляемом путём изменения электрического тока в нагревателе. В общем виде закон регулирования для вторичного преобразователя может быть представлен в виде

$$\frac{dI}{dt} = k_1 \Delta T_{set} - k_1 \Delta_{1,2} - k_1 k_3 \Delta_{3,2} - k_1 \tau_1 \frac{d\Delta_{1,2}}{dt} - k_1 k_3 \tau_1 \frac{d^2 \Delta_{3,2}}{dt^2}, \quad (11)$$

где I – электрический ток в нагревателе; k_1 , τ_1 – постоянные коэффициенты.

При разработке вторичного преобразователя сложной задачей является определение оптимальных значений k_1 и τ_1 , которые могут быть получены при использовании известных методов теории систем автоматического регулирования. Для нелинейных систем автоматического регулирования математический аппарат, используемый при её синтезе, является довольно громоздким и не всегда обеспечивает получение желаемых характеристик системы. Кроме того, исследования некоторых характеристик системы наиболее удобно проводить путём её моделирования на компьютере и проведения численных экспериментов. Для этой цели в работе предлагается экспериментально-теоретический метод определения параметров рассматриваемой системы k_1 и τ_1 , приводящей к задаче оценивания вектора параметров

$$\Theta = [\Theta_1, \Theta_2]^T = [k_1, \tau_1]^T$$

математической модели преобразователя.

Во вторичном преобразователе при регулировании использованы эквивалентные по амплитудно-фазовой характеристике инерционные звенья.

Математическая модель преобразователя описывается уравнением (11), где

$$\frac{d\Delta_{1,2}}{dt} = \frac{A W_{tb}}{\tau_2} e^{-m x_1} - \frac{1}{\tau_2} \Delta_{1,2};$$

$$\frac{d^2 \Delta_{3,2}}{dt^2} = \frac{A e^{-m x_3} W_{tb}}{\tau_3 \tau_4} - \frac{\tau_3 + \tau_4}{\tau_3 \tau_4} \frac{d\Delta_{3,2}}{dt} - \frac{\Delta_{3,2}}{\tau_3 \tau_4}; \quad (12)$$

$$A = \frac{(e^{mL} - e^{-mL})}{4\pi d_{tb} L \lambda_{tb} l_{tb} m^2};$$

$$W_{tb} = I^2 R_{wrm} - k_\alpha \Delta \alpha_{tb};$$

$$U_{ex} = I R_{wrm}.$$

В уравнениях (12) k_2 , k_α , τ_2 , τ_3 , τ_4 – постоянные коэффициенты; U_{ex} – выходное напряжение нагревателя; R_{wrm} – сопротивление нагревателя; $\Delta \alpha_{tb}$ – изменение коэффициента теплоотдачи α_{tb} .

В основу метода положена параметрическая идентификация по кривым переходных процессов исследуемого преобразователя. Оценивание коэффициентов будем проводить путём минимизации функции невязки между заданными значениями из-

менения выходного напряжения ΔU_{ex} на нагревателе относительно $U_{\text{ex},0}$ и прогнозом $\Delta \hat{U}_{\text{ex}}(t_k, \Theta)$:

$$\Phi(\Theta) = \sum_{k=1}^N \left(\Delta U_{\text{ex},k} - \Delta \hat{U}_{\text{ex}}(t_k, \bar{\Theta}) \right)^T \times \left(\Delta U_{\text{ex},k} - \Delta \hat{U}_{\text{ex}}(t_k, \bar{\Theta}) \right), \quad (13)$$

где $\Delta U_{\text{ex},k}$ – заданные изменения выходного напряжения в моменты времени t_k , $k=1, \dots, N$; $\Delta \hat{U}_{\text{ex}}(t_k, \bar{\Theta})$ – решение уравнения (11) в моменты времени t_k .

Для минимизации функции (13) применялся алгоритм композиции методов наискорейшего спуска, квазиньютоновского и координатного. В квазиньютоновском методе оценка матрицы Гессе вторых частных производных проводится по формуле Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шэнно [2].

В процессе минимизации с использованием квазиньютоновского алгоритма на каждой итерации требуются вычисления градиента функции невязки $\Phi(\Theta)$. Компоненты градиента функции (13) вычисляются по формуле

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta_i} = -2 \sum_{k=1}^N \left(\Delta U_{\text{ex},k} - \Delta \hat{U}_{\text{ex}}(t_k, \bar{\Theta}) \right)^T \frac{\partial \Delta U_{\text{ex}}(t_k, \bar{\Theta})}{\partial \vartheta_i}, \quad (14)$$

где $H_{i,k} = \frac{\partial \Delta \hat{U}_{\text{ex}}(t_k, \bar{\Theta})}{\partial \vartheta_i}$ – производные от решения уравнения (11) по ϑ_i ($i=1, 2$), которые называются функциями чувствительности [3].

Функции чувствительности являются решениями дифференциальных уравнений (уравнений чувствительности [3]), которые получаются в результате дифференцирования уравнения (11) по ϑ_i .

В данной работе для вычисления функций чувствительности применяется подход, основанный на современном решении уравнения (11) и уравнений чувствительности. При этом используется экономичный алгоритм [4], основанный на применении метода Розенброка второго порядка аппроксимации [5].

Для доказательства эффективности предложенного алгоритма в рассматриваемых условиях проведем математическое моделирование процедуры оптимального оценивания вектора параметров модели (11) по методу, описанному в работе [6]. При этом исследуем сходимость результатов оценивания параметров к действительным Θ_0 или равным им эталонным значениям $\Theta_{\text{гф}}$. Измерение и расчёт ΔU_{ex} проводили для дискретных моментов времени с интервалом $\Delta t = 0,1$ с. Анализ сходимости результатов оценивания параметров показал устойчивую

сходимость процедуры параметрической идентификации при различном задании начальных значений вектора параметров: разница между оценками параметров $\hat{\Theta}$ и эталонными значениями $\Theta_{\text{гф}}$ не превышает 1% от эталонных значений $\Theta_{\text{гф}}$.

Результаты параметрической идентификации модели (12) по предложенной методу имеют следующие значения

$$\Theta = (0, 6; 6, 6)^T.$$

Определение погрешностей оценок параметров Θ проведём по методу, описанному в работе [6].

Он основан на построении и анализе ковариационной матрицы погрешностей оценок.

Диагональные элементы матрицы являются дисперсиями оценок параметров, а остальные позволяют рассчитать их взаимные корреляции. По значениям дисперсий определялись доверительные интервалы I_{Θ} при доверительной вероятности $\beta = 0,95$.

Расчётные погрешности оценок параметров при погрешности измерения расхода $\delta = 3\%$ не превышают $\delta_{\Theta} = 5\%$.

Разработанный термоконвективный преобразователь расхода и температуры жидкости был использован для определения параметров теплообмена агрегатов и трубопроводов гидросистемы маневренного самолёта.

Заключение

Разработан термоконвективный преобразователь расхода и температуры жидкости в трубопроводах двигателя летательного аппарата. Для повышения быстродействия и снижения чувствительности к изменению теплопроводности стенок трубопроводов оптимизированы параметры первичного преобразователя с использованием алгоритма Хука-Дживса. При минимально возможном для рассматриваемого первичного преобразователя значения $x_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м параметры x_3 и k_3 имеют следующие оптимальные величины $x_3 = 9 \cdot 10^{-2}$ м и $k_3 = 4,7$ для коэффициента теплоотдачи трубопровода $\alpha_{\text{тб}} = 35 - 200$ Вт/(м²·К). Определение характеристик вторичного преобразователя проводилось экспериментально-теоретическим методом по алгоритму композиции методов наискорейшего спуска, квазиньютоновского и координатного. В квазиньютоновском методе оценка матрицы Гессе вторых частных производных проводится по формуле Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шэнно. Параметры модели оптимального регулирования вторичным преобразователем рассматриваемой системы имеют следующие величины: $k_1 = 0,6$ и $\tau_1 = 6,6$. Определение

погрешностей оценок параметров преобразователя выполнялось по методу, основанному на построении и анализе ковариационной матрицы погрешностей оценок. Погрешности оценок параметров при погрешности измерения расхода $\delta = 3\%$ не превышают $\delta_{\Theta} = 5\%$.

Литература

1. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст]: моногр. / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
2. Гилл, Ф. Практическая оптимизация [Текст]: моногр. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райг. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
3. Розенвассер, Е.Н. Чувствительность систем управления [Текст]: моногр. / Е.Н. Розенвассер,

Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 1961. – 44 с.

4. Гусев, С.А. Алгоритм и идентификации параметров жёстких систем обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / С.А. Гусев, Г.В. Демидов. – Новосибирск: ВЦ АН СССР, 1983. – 17 с. (Преп. ВЦ АН СССР № 484).

5. Демидов, Г.В. Оценка ошибки одношаговых методов интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / Г.В. Демидов, Е.А. Новиков // Численные методы механики сплошной среды: сб. науч. тр. АН СССР, Сиб. отд-ние, ВЦ, Ин-т теорет. и прикл. механики; редкол.: В.Г. Дулов (отв. ред.) и др. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985. – Т. 16, № 1. – С. 27–42.

6. Бард, И. Нелинейное оценивание параметров [Текст]: моногр. / И Бард. – М.: Статистика, 1979. – 349 с.

Поступила в редакцию 30.03.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, начальник отдела В.А. Бернс, Федеральное государственное унитарное предприятие «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», Новосибирск, Россия.

ТЕРМОКОНВЕКТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВИТРАТИ І ТЕМПЕРАТУРИ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДАХ ДВИГУНА ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

В.М. Ніколаєв, Ю.М. Кабанов

Розроблено перетворювач витрати і температури рідини в трубопроводах двигуна літального апарата. Для підвищення швидкодії та зниження чутливості до зміни теплопровідності стінок трубопроводів було використано термоконвективний метод постійної температури. Завдання з оптимізації параметрів первинного перетворювача було розв'язане із використанням алгоритму Хука-Дживса. Визначення характеристик вторинного перетворювача проводилось експериментально-теоретичним методом за алгоритмом композиції методів найскорішого спуску, квазіньютонівського і координатного. В квазіньютонівському методі оцінка матриці Гессе других частинних похідних проводиться за формулою Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шенно. Визначення похибок оцінок параметрів перетворювача виконане за методом, що оснований на побудові і аналізі коваріаційної матриці похибок оцінок.

Ключові слова: математична модель, перетворювач витрати і температури, термоконвективний метод, термоперетворювач, трубопровід, параметрична ідентифікація, похибка параметричної ідентифікації.

A THERMAL-CONVECTION TRANSDUCER OF FLUID CONSUMPTION AND TEMPERATURE IN PIPELINES OF AIRCRAFT ENGINE

V.N. Nikolayev, Y.N. Kabanov

A transducer of fluid consumption and temperature in pipelines of aircraft engine has been developed. A thermal-convection method of uniform temperature was used for enhancement of operating speed and reduction of sensitivity to the change of the pipe walls thermal conduction. The task of optimization of the sensing device parameters was solved by using the Hook-Jeeves algorithm. Secondary transducer characterization was carried out with the aid of experimental and theoretical method by an algorithm of composition of methods: steepest descent, quasi-Newton and coordinate methods. In the quasi-Newton method the estimation of the Hessian matrix of second partial derivatives was carried out by the Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno formula. Error estimation of the transducer estimated parameters was performed by the method based on construction and analysis of the estimation error covariance matrix.

Key words: mathematical model, transducer of consumption and temperature, thermo-convective method, temperature transducer, pipeline, parametric identification, parametric identification error.

Николаев Владимир Николаевич – канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина», Новосибирск, Россия, e-mail: nikvla50@mail.ru.

Кабанов Юрий Николаевич – ведущий инженер ФГУП «Научно-исследовательский институт электронных приборов», Новосибирск, Россия, e-mail: unikab@bk.ru.