

УДК 681.5.09

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ БОРТОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Кузнецова Т.А., Губарев Е.А.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: tak@pstu.ru

Проводится анализ методов повышения точности идентификации входных информационных потоков бортовой математической модели, встроенной в систему автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя. Предлагается применение алгоритмов фильтрации по Калману. Разрабатывается алгоритм обнаружения и локализации неисправности измерительного канала двухканального датчика, встраиваемый в алгоритм Калман-фильтрации. Целью исследования является анализ точности разработанных алгоритмов идентификации входных информационных потоков встроенной математической модели газотурбинного двигателя, основанных на методах Калман-фильтрации со встроенной логикой обнаружения отказа измерительного канала. Приведено теоретическое обоснование возможности применения предложенных алгоритмов. Алгоритм фильтрации строится на генерации оптимальной оценки идентифицируемого параметра с применением вероятностных методов поиска минимума среднеквадратичной ошибки. При этом сравниваются расчетное и измеренное значения идентифицируемого параметра. Логика обнаружения и локализации отказа измерительного канала строится на определении сигнатуры отказа как взвешенной суммы квадратов отклонений измеренных значений от их оптимальных оценок по Калману. На основе предложенных алгоритмов разработаны Simulink-модели и проведена апробация их эффективности в среде MatLab. Проведен модельный эксперимент с целью получения частотных характеристик разработанных устройств и их соединений с целью оценки их влияния на устойчивость системы автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя. Сделан вывод о высокой точности разработанных алгоритмов идентификации входного управляющего сигнала встроенной бортовой математической модели и возможности их практического применения в составе систем автоматического управления современных авиационных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: газотурбинный авиационный двигатель, система автоматического управления, идентификация, встроенная бортовая математическая модель, информационные потоки, канал измерения, фильтр Калмана, оптимальная фильтрация, обнаружение и локализация отказа, ЛАЧХ, ЛФЧХ, запас устойчивости, точность, надежность, отказоустойчивость

FAULT-TOLERANT IDENTIFICATION ALGORITHMS OF INPUT INFORMATION FOR ON-BOARD MATHEMATICAL MODELS BUILT-IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AIRCRAFT ENGINES

Kuznetsova T.A., Gubarev E.A.

State National Research Politechnical University, Perm, e-mail: tak@pstu.ru

The analysis of methods for improvement of the identifying accuracy of on-board mathematical model's input information stream is performed. The model is built in automatic control system of aircraft gas-turbine engine. The use of Kalman-filtering algorithms is offered. The fault detection and isolation logic for measuring channels of dual-channel sensor, as the part of Kalman-filtering algorithm, was developed. The purpose of research is to analyze the accuracy of the developed identifying algorithms of input information stream included in mathematical model of a gas-turbine engine, based on the Kalman-filtering methods with built-in fault detection logic for measurement channels. The theoretical justification of the possibility of the proposed algorithm's use was performed. The filtering algorithm is based on the generation of optimal estimation of identified parameter with use of probabilistic methods of mean square error minimization. The calculated and the measured value of the identifying parameter are compared for this purpose. Logic detection and localization failure of measuring channel is based on the definition of the fault-signature as a weighted sum of squared deviations of the measured values from their optimal Kalman-estimates. The Simulink-models were developed on the basis of the proposed algorithms and their effectiveness was tested in the MatLab environment. The model experiments were done for obtaining the frequency characteristics of the developed devices and their connections. So their impact on the stability of the automatic control system of aircraft gas-turbine engine was assessed. It was concluded the high accuracy of the developed identification algorithms for input information of the built-in on-board mathematical model and the possibility of their practical use in the automatic control systems of modern aircraft gas-turbine engines.

Keywords: gas-turbine aircraft engine, automatic control system, identification, built-in on-board mathematical model, information flows, channel measurement, the Kalman filter, optimal filtering, fault detection and isolation, logarithmic amplitude frequency response, logarithmic phase frequency response, stability margin, accuracy, reliability, fault tolerance

К настоящему времени аппаратный облик цифровых систем управления авиационных газотурбинных двигателей (САУ ГТД) определен в виде двухканальной (дубли-

рованной) схемы с «полной ответственностью». Требование дальнейшего повышения надежности системы выполняется путем не аппаратного (троирование, квадрирование),

а алгоритмического резервирования. С этой целью в САУ встраивается математическая модель двигателя, позволяющая выполнять не только функции определения отказов информационных каналов, но и замещения информации отказавших каналов. Эта бортовая встроенная математическая модель двигателя (ВММ ГТД) принадлежит к особому классу моделей в силу специфических требований к ней: надежная работа в реальном масштабе времени (а следовательно, высокое быстродействие – частота выдачи решения 50 Гц), ограниченный объем памяти (объем порядка 100 КБ) при сохранении достаточно высоких требований к точности отображения в статике и динамике в большом диапазоне режимов работы, полетных условий и состояний двигателя [1]. При этом важным условием выполнения требований точности является обеспечение корректности управляющего сигнала на входе ВММ, что достигается и идентификацией неисправности информационных каналов.

Целью исследования является анализ точности разработанных алгоритмов идентификации входных информационных потоков ВММ ГТД, основанных на методах Калман-фильтрации со встроенной логикой обнаружения отказа измерительного канала.

Материалы и методы исследования

Поскольку одной из приоритетных задач систем автоматического управления (САУ) ГТД является обеспечение стабильности параметров работы двигателя, путем корректного дозирования подачи топлива (расхода топлива – G_T) в основную камеру сгорания, для обеспечения надежности входной информации ВММ ГТД производится фильтрация входных информационных потоков, для чего строится отказоустойчивый блок фильтрации, включающий математическую модель канала дозирующей иглы (ДИ). Математическая модель ДИ позволяет получить расчетные данные о расходе топлива по заданному значению положения поршня ДИ ($x_{ди}^{зад}$). Выходным сигналом модели ДИ является прогнозируемое (модельное) значение положения поршня – $x_{ди}$. При этом передаточная функция ДИ имеет вид

$$W_{ди}(p) = \frac{x_{ди}^{зад}}{x_{ди}} = \frac{1}{0,1p + 1}. \quad (1)$$

Учитывая, что САУ ГТД работает в условиях помех, как в канале модели (обусловленных ее неточностью), так и в канале измерения (обусловленных погрешностью измерителей – датчиков), для обеспечения надежности идентификации управляющего сигнала G_T на выходе модели ДИ подключен рекурсивный фильтр Калмана, основным свойством которого является его способность к адаптации – самокоррекции в процессе фильтрации данных. Алгоритмы самокоррекции строятся на определении в текущий момент t_k оптимального коэффициента Калмана (K_k) в результате решения задачи минимизации математического ожидания квадрата ошибки идентифицируемого параметра $\min M(e_k^2)$ с учетом оптимальной

оценки в предыдущий момент. Коэффициент Калмана задает вероятностное соотношение модельной и измеренной составляющих в оптимальном значении идентифицируемого $x_{ди}$. Алгоритм Калман-фильтрации [2] включает вычисление на каждом шаге:

$$M(e_{k+1}^2) = \frac{\sigma_\eta^2 (M(e_k^2) + \sigma_\xi^2)}{M(e_k^2) + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2};$$

$$K_{k+1} = \frac{M(e_k^2) + \sigma_\xi^2}{M(e_k^2) + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}; \quad (2)$$

$$\hat{X}_{ди,k+1}^{opt} = K_{k+1} \cdot z_{k+1} + (1 - K_{k+1}) \cdot (\hat{X}_{ди,k}^{opt} + X_{ди,k}), \quad (3)$$

где $M(e_{k+1}^2)$ – минимальное значение математического ожидания квадрата ошибки; ξ_k , η_k – ошибки модели и датчика; K_{k+1} – коэффициент Калмана; σ_ξ^2 , σ_η^2 – дисперсии модели и датчика; $X_{ди,k}^{opt}$ – оптимальная оценка идентифицируемой величины перемещения поршня; z_k – показание датчика перемещения поршня; $X_{ди,k} = \dot{X} \cdot \Delta t$ – приращение перемещения поршня, полученное на $(k+1)$ -м шаге с помощью разработанной математической модели ДИ.

Совместное решение дифференциальных уравнений (2)–(3) позволило определить передаточную функцию фильтра Калмана:

$$W_{фк}(p) = 1. \quad (4)$$

Возможность применения алгоритма Калман-фильтрации для решения рассматриваемой задачи обусловлена нормальностью распределения случайных величин и эргодичностью случайных процессов в каналах управления и измерения, доказанными на основе статистической обработки данных натурных испытаний двигателя [3].

Как показано выше, качество фильтрации во многом определяется валидностью используемых в вычислениях измерений перемещения поршня. Реализуемое на практике аппаратное резервирование предусматривает дублирование измерений с помощью двухканальной системы датчиков. В этой связи актуальной задачей является обеспечение надежной идентификации неисправных информационных каналов, для чего предлагается в алгоритмы Калман-фильтрации включать дополнительную логику обнаружения и локализации отказа (ОЛО) канала датчика, обеспечивающую повышение надежности [4].

Неисправности датчика относят к так называемым «мягким» отказам, характеризующимся относительно небольшим расхождением между истинным и измеренным значениями, поэтому их трудно обнаружить с помощью обычной проверки рабочего диапазона. Предлагается для оценки точности измерения группы датчиков использовать банки фильтров Калмана [5], позволяющие генерировать вектор (матрицу-столбец) отклонений:

$$\mathbf{e}^i = \hat{\mathbf{x}}^{opt i} - \mathbf{z}_{ди}^i, \quad (5)$$

где для i -датчика e^i – ошибка оценки; $x^{opt i}$ – оптимальная оценка (на выходе соответствующего фильтра Калмана); $z_{ди}^i$ – измеренное значение перемещения поршня.

Для идентификации отказа датчиков вычисляется взвешенная сумма квадратов отклонений WSSR (Weighted Sum of the Squares of Residuals) которую

называют также признаком или сигнатурой отказа [6] – с помощью матричного уравнения

$$WSSR^i = \mathbf{W}_r^i (\boldsymbol{\epsilon}^i)^T (\boldsymbol{\Sigma}^i)^{-1} \boldsymbol{\epsilon}^i, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\Sigma}^i = \text{diag}[\boldsymbol{\sigma}^i]^2$.

Вектор $\boldsymbol{\sigma}^i$ представляет стандартные (паспортные) отклонения i -датчика и нормирует вектор отклонений. Скалярный весовой коэффициент W_r является параметром инженерной настройки, и его выбирают таким образом, чтобы уровень $WSSR$ -сигнала был меньше заданного порогового значения в номинальном состоянии, когда все датчики исправны.

Следует отметить, что при $W_r = 1$ и равенстве $\epsilon^i = \sigma^i$ $WSSR$ равен числу датчиков в рассматриваемой группе. Для случая $\epsilon^i \neq \sigma^i$ применима упрощенная формула

$$WSSR = \sum \frac{\epsilon^2}{\sigma^2}. \quad (7)$$

Тогда для одного канала двухканального датчика справедливо

$$WSSR = \frac{\epsilon^2}{\sigma^2}. \quad (8)$$

Поэтому чем меньше сигнатура отказа, тем меньше вероятность отказа датчика.

В предлагаемой разработке сигнал сигнатуры отказа вырабатывается на основе сравнения текущего измерения обоих каналов $z_{ди l}$ ($l = 1, 2$) и оптимальной оценки величины перемещения поршня \hat{x}^{opt} на предыдущем шаге с помощью алгоритма обнаружения и локализации отказа (ОЛО) каналов измерения, встраиваемого в алгоритм Калман-фильтрации.

Для обнаружения неисправности датчика $WSSR$ сравнивается с пороговым значением, величина которого выбирается путем экспертной оценки на основе

статистической обработки экспериментальных данных для индивидуального двигателя. Следует учитывать, что малая величина порогового значения может привести к ложным срабатываниям, большая – к необнаружению отказов. Ряд специалистов [4, 6] рекомендуют задавать сигнатуру отказа в диапазоне [1.5; 2]. В данном исследовании был выбран порог, равный 2. Алгоритм обнаружения и локализации отказа (ОЛО) канала датчика хода поршня иллюстрируется табл. 1.

С выхода отказоустойчивого блока фильтрации (со встроенным алгоритмом ОЛО) сигнал хода поршня поступает на дифференциальный клапан (регулятор перепада давления), математическая модель которого строится на соотношениях

$$G_{T1} = G_{Tди} + \Delta G_T \quad \text{и} \quad \frac{dG_T}{dt} = \frac{1}{T_1} \cdot (G_{T1} - G_T), \quad (9)$$

где $T_1 = 0,05$ с, а зависимости $\Delta G_T = f(X_{ди})$, $G_{T1} = f(X_{ди})$ задаются в виде экспериментальных таблиц. Выходным параметром дифференциального клапана является расход топлива G_T , который поступает на вход ВММ ГТД.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты моделирования в среде MatLab ситуаций, когда оба измерительных канала двухканального датчика исправны (в качестве выходного сигнала ОЛО берется сигнал с датчика с меньшим $WSSR$) и при отказе второго канала, наступившем в момент $t = 3,2$ с (в качестве выходного сигнала берется сигнал с исправного канала), приведены на рис. 1.

Таблица 1

Алгоритм обнаружения и локализации отказа канала двухканального датчика

WSSR1	WSSR2	Ситуация	На выход поступает
≤ 2	≤ 2	Оба канала исправны	Отфильтрованное $x_{ди}$ канала с $\min WSSR$
≤ 2	≥ 2	Отказ второго канала	Отфильтрованное (по Калману) $x_{ди}$ первого канала
≥ 2	≤ 2	Отказ первого канала	Отфильтрованное (по Калману) $x_{ди}$ второго канала
≥ 2	≥ 2	Оба канала отказали	Модельное значение $x_{ди}$

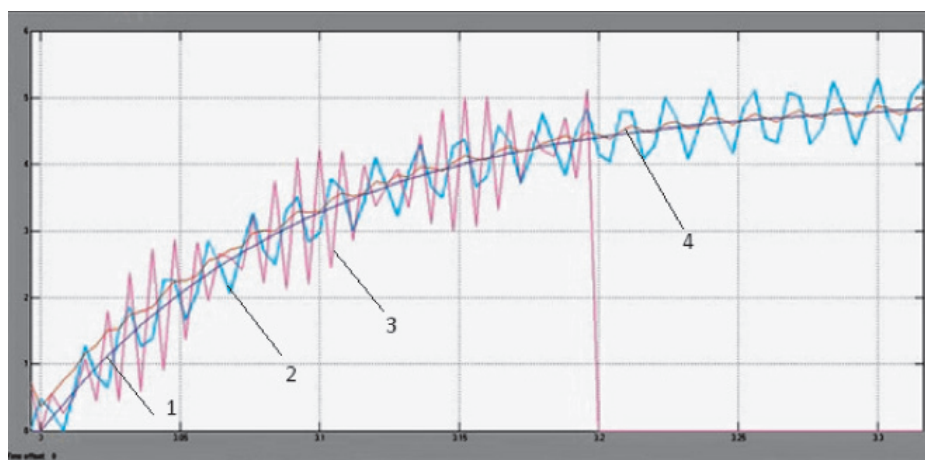


Рис. 1. Результаты моделирования в среде MatLab ситуаций, когда оба измерительных канала двухканального датчика исправны и при неисправности второго канала: 1 – модельное значение, 2, 3 – измерение первого и второго канала, 4 – выходной сигнал

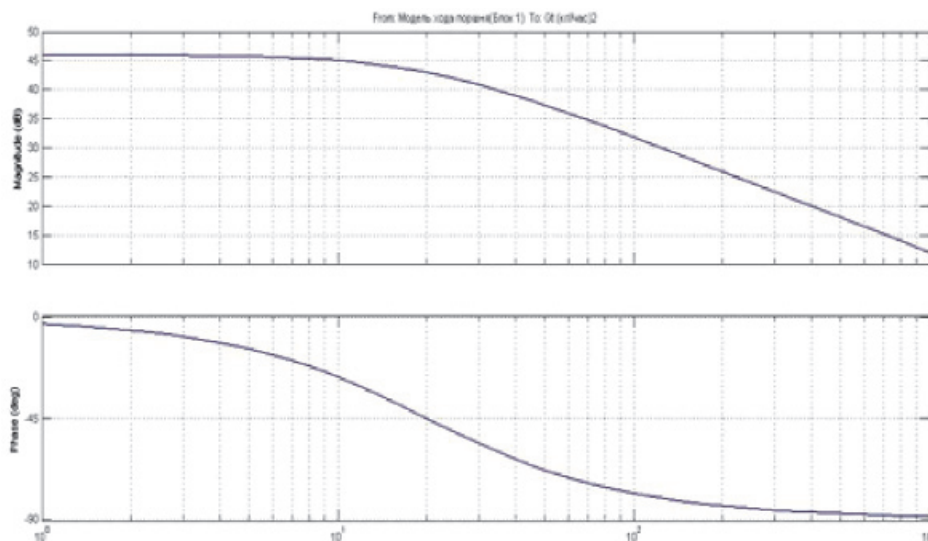


Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ части блока ввода информации в ВММ, полученные в MatLab

Важным показателем надежности системы является ее устойчивость, определяемая видом частотных характеристик систем.

Результаты моделирования в среде MatLab логарифмических амплитудно-фазочастотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ) соединения элементов, включающего фильтр Калмана со встроенным блоком ОЛО и дифференциальный клапан (регулятор перепада давления), приведены на рис. 2. На вход последовательного соединения элементов подается сигнал – $X_{\text{ди}}$ с выхода математической модели ДИ, на выходе – сигнал расхода топлива G_T .

Полученные в результате модельного эксперимента ЛАЧХ и ЛФЧХ соответствуют классическому аperiodическому звену первого порядка с параметрами:

- коэффициент усиления определяется из $20 \lg k = 46$ дБ и равен $k = 199,53 \approx 200$;
- постоянная времени

$$T_2 = 1/\omega_2 = 1/20 = 0,05 \text{ с};$$

- наклон ЛАЧХ при $\omega > \omega_1$ равен – 20 дБ/дек;

– частота среза определяется из $L(\omega_{\text{ср}}) \approx 20 \lg(k/T\omega_{\text{ср}}) = 0$ и равна $\omega_{\text{ср}} = k/T \approx 4 \cdot 10^3$ рад/с;

- фаза на всем диапазоне частот изменяется от 0 до -90° ;

- величина фазы на частоте среза

$$(\omega_{\text{ср}}) = -\arctg(T_1 \omega_{\text{ср}}) = -89,71^\circ.$$

Передачная функция рассматриваемого соединения элементов совпадает с передачной функцией дифференци-

ального клапана (регулятора перепада давления):

$$W_2(p) = \frac{G_T(p)}{X_{\text{ди}}(p)} \approx \frac{200}{0,05p + 1}. \quad (10)$$

Это подтверждает правильность аналитических преобразований, позволивших вычислить передаточную функцию фильтра Калмана в виде (4). Кроме того, результаты модельного эксперимента позволяют утверждать, что

$$W_{\text{оло}}(p) = 1. \quad (11)$$

Общая передаточная функция отказоустойчивого блока ввода входной информации ВММ ГТД равна:

$$W_3(p) \approx \frac{1}{0,1p + 1} \cdot \frac{200}{0,05p + 1}. \quad (12)$$

Поскольку корни характеристического уравнения рассматриваемого блока ввода $p_1 = -10 \text{ с}^{-1}$, $p_2 = -20 \text{ с}^{-1}$ – действительны и отрицательны, он является аperiodическим звеном второго порядка. ЛАЧХ и ЛФЧХ отказоустойчивого блока ввода информации представлены на рис. 3.

Параметры отказоустойчивого блока ввода информации:

- коэффициент усиления определяется из $20 \lg k = 46$ дБ и равен $k = 199,53 (\approx 200)$;
- постоянные времени

$$T_2 = 1/\omega_2 = 1/20 = 0,05;$$

$$T_1 = 1/\omega_1 = 1/10 = 0,1;$$

- наклон ЛАЧХ при $\omega_1 < \omega < \omega_2$ равен – 20 дБ/дек, при $\omega > \omega_2$ равен – 40 дБ/дек;

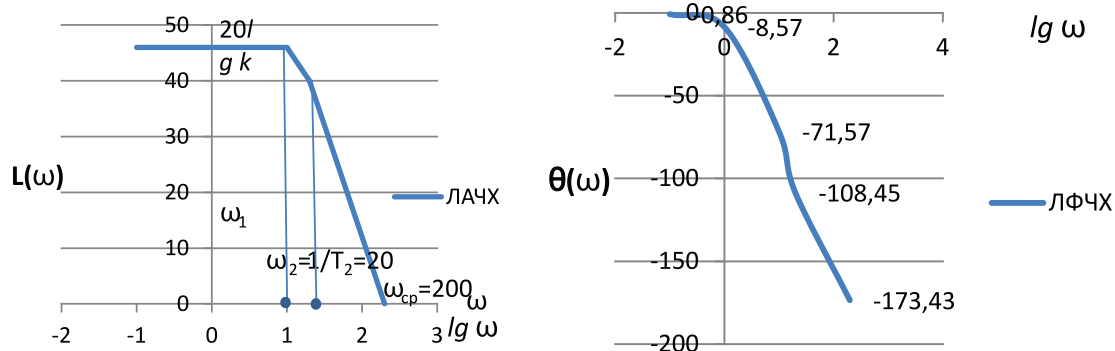


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ отказоустойчивого блока ввода входной информации ВММ

Следует отметить, что рассмотренный блок охвачен через САУ обратной связью, что повышает его запас устойчивости.

– частота среза определяется из

$$L(\omega_{cp}) \approx 20 \lg \left(\frac{k}{T_1 T_2 \omega_{cp}^2} \right) = 0$$

и равна $\omega_{cp} \approx 200$ рад/с;

– фаза на всем диапазоне частот изменяется от 0 до -180° ;

– величина фазы на частоте среза

$$\theta(\omega_{cp}) = -(\arctg(T_1 \omega_{cp}) + \arctg(T_2 \omega_{cp})) = -173,43^\circ.$$

Выводы

Важным результатом проведенного исследования частотных свойств является доказательство равенства единице коэффициента усиления разработанного отказоустойчивого блока фильтрации и отсутствия дополнительных фазовых сдвигов, внесенных возможным чистым запаздыванием, обусловленным особенностями реализуемых алгоритмов обнаружения отказов измерительных каналов и Калман-фильтрации входной информации ВММ. Тем самым доказываются отсутствие их влияния на устойчивость САУ ГТД.

Апробация разработанных алгоритмов показала, что средняя относительная ошибка динамики составляет 0,168%, которая в статике при максимальном расходе $G_T = 3800$ кг/ч снижается до 0,01%, что соответствует современным требованиям точности алгоритмов идентификации по контуру ДИ.

Все это подтверждает работоспособность и практическую ценность разработанных алгоритмов.

Список литературы

1. Августиневич В.Г. и др. Идентификация систем управления авиационных ГТД / под общ. ред. В.Т. Дедеша. – М.: Машиностроение, 1984. – 196 с.
2. Кузнецова Т.А., Губарев Е.А., Лихачева Ю.В. Алгоритмы оптимальной фильтрации в задачах идентификации параметров систем автоматического управления авиацион-

ных двигателей // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12, № 9. – С. 12–20.

3. Кузнецова Т.А., Августиневич В.Г., Якушев А.П. Статистический анализ процессов в системах управления авиационных двигателей с бортовыми математическими моделями // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 35 – С. 236–238.

4. Borguet S., Leonard O. A sensor-fault-tolerant diagnosis tool based on a quadratic programming approach // Proc. of ASME Turbo Expo 2007. – Paper GT2007-27324. – 10 p.

5. Kobayashi T., Simon D.L. Application of a bank of Kalman filters for aircraft engine fault diagnostics // Proc. of ASME Turbo Expo 2003. – Paper GT2003-38550. – 10 p.

6. Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management // Proc. of ASME Turbo Expo 2007. – Paper GT2007-27518 – 11 p.

References

1. Avgustinovich V.G. etc. Identifikacija sistem upravljenja aviacionnyh GTD / Pod obshhej redakciej V.T. Dedesha. M.: Mashinostroenie, 1984. 196 p.
2. Kuznetsova T.A., Gubarev E.A., Lihacheva Ju.V. Algoritmy optimalnoj filtracii v zadachah identifikacii parametrov sistem avtomaticheskogo upravljenja aviacionnyh dvigatelej // Informacionno-izmeritelnye i upravljajushhie sistemy. 2014. Vol. 12, no. 9. pp. 12–20.
3. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Jakushev A.P. Statisticheskij analiz processov v sistemah upravljenja aviacionnyh dvigatelej s bortovymi matematicheskimi mode-ljami // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzhja. 2014. no. 35 pp. 236–238.
4. Borguet S., Leonard O. A sensor-fault-tolerant diagnosis tool based on a quadratic programming approach // Proc. of ASME Turbo Expo 2007. Paper GT2007-27324. 10 p.
5. Kobayashi T., Simon D.L. Application of a bank of Kalman filters for aircraft engine fault diagnostics // Proc. of ASME Turbo Expo 2003. Paper GT2003-38550. 10 p.
6. Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management // Proc. of ASME Turbo Expo 2007. Paper GT2007-27518 11 p.

Рецензенты:

Труфанова Н.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой конструирования и технологий в электротехнике, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Кавалеров Б.В., д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Электротехника и электромеханика», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.