

# Аналитическое резервирование каналов измерений цифровой системы управления газотурбинного двигателя на основе адаптивного фильтра Язвинского

Иноземцев А.А.<sup>1</sup>, Грибков И.Н.<sup>1</sup>, Ламанова Н.Г.<sup>2</sup>, Плешивых А.С.<sup>1,2</sup>, Саженьков А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

e-mail: pleshivich-as@avid.ru

Предложен алгоритмический метод, позволяющий повысить отказоустойчивость цифровых систем автоматического управления газотурбинных двигателей, основанный на использовании оптимального наблюдателя – адаптивного фильтра Язвинского, согласованного с математической моделью двигателя. Моделирование алгоритма проведено по данным летных испытаний двигателя типа ПС-90А в составе самолета Ту-214 на стационарном и переходном режимах работы.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, система автоматического управления, аналитическое резервирование, адаптивный фильтр Язвинского

## Analytical redundancy of measurement channels in a digital control system of a gas turbine engine based on the adaptive Yazvinsky filter

Inozemtsev A.A.<sup>1</sup>, Gribkov I.N.<sup>1</sup>, Lamanova N.G.<sup>2</sup>, Pleshivikh A.S.<sup>1,2</sup>, Sazhenkov A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UEC-Aviadvigatel joint stock company, Perm

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm

An algorithmic method is proposed to increase the fault tolerance of digital automatic control systems of gas turbine engines, based on the use of the optimal observer – the adaptive Yazvinsky filter, consistent with the mathematical model of the engine. Simulation of the algorithm was carried out according to flight tests of the PS-90A engine as part of the Tu-214 aircraft in stationary and transient modes of operation.

**Keywords:** gas turbine engine, automatic control system, analytical redundancy, adaptive Yazvinsky filter

### Введение

К современным цифровым системам автоматического управления (САУ) газотурбинных двигателей (ГТД) предъявляют высокие требования по надежности и устойчивости к различного рода нарушениям работы и отказам. Под устойчивостью к отказам понимают способность динамических систем выполнять свои функции после выявления отказа при допущении приемлемого снижения качества управления систем двигателя. Требуемый уровень отказоустойчивости сложных динамических систем достигается созданием информаци-

ной избыточности посредством аппаратного или аналитического резервирования.

Традиционно отказоустойчивость электронных САУ ГТД обеспечивается путем аппаратного резервирования, т.е. дублирования систем управления и измерения, когда показания неисправных или отказавших датчиков заменяют показаниями дублирующих каналов. Так, например, электронная САУ двигателя ПС-90А (рис. 1) – двухканальная, цифровая, имеет в своем составе электронный регулятор (РЭД-90), состоящий из основного (первого) и дублирующего (второго) каналов (рис. 2). Обычно работает основной канал, а второй находится

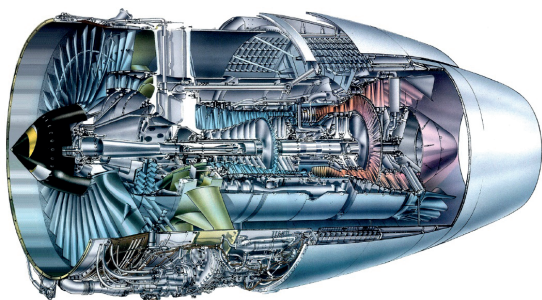


Рис. 1. Общий вид двигателя ПС-90А

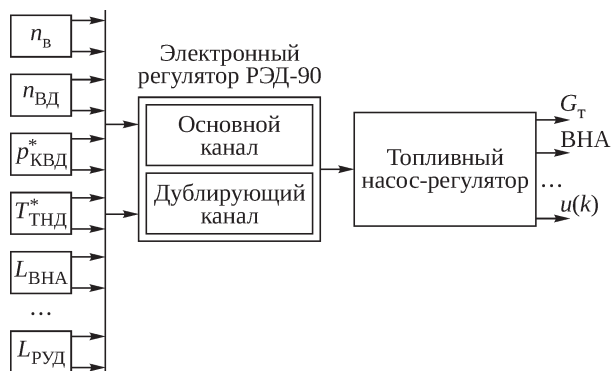


Рис. 2. Укрупненная блок-схема электронной части САУ двигателя ПС-90А

в резерве; каналы идентичны по своей структуре и функциям. Каждый канал электронного регулятора получает информацию о параметрах двигателя от независимого комплекта датчиков и/или от соответствующего датчика измерения параметра, имеющего дублирование измерительных цепей [1]. Необходимо отметить, что двухканальный принцип построения является для современных цифровых систем управления ГТД достаточно распространенным, он получил развитие в двигателях ПД-14 и ПД-35 разработки АО «ОДК-Авиадвигатель».

В системе встроенного контроля электронной части САУ-90 предусмотрен допусковый контроль, перекрестный контроль и темповый контроль каналов измерений параметров САУ ГТД. В случае возникновения отказа одного из двух каналов измерения происходит отключение неисправного канала и управление осуществляется по исправному. В случае возникновения двойного отказа каналов измерений или отказа по перекрестному контролю каналов измерений основных параметров ГТД в разных каналах САУ-90 происходит отключение обоих управляющих каналов электронной части и переход на резервное гидромеханическое управление [1].

При создании информационной избыточности посредством аналитического резервирования используют алгоритмические методы, в которых показания неисправных или отказавших датчиков заменяют расчетными оценками, вычисленными на основе показаний исправных датчиков и математической модели объекта управления. Аналитическое резервирование в САУ ГТД может

служить дополнительным источником информации о состоянии двигателя, повысить надежность процесса идентификации неисправности канала измерения и, следовательно, предотвратить отключение электронной системы управления и переход на резервное гидромеханическое управление, как правило, с пониженной эффективностью.

Вопросам алгоритмического обеспечения САУ ГТД уделяют особое внимание. Об этом свидетельствует большое количество научных работ, где рассматриваются различные методы и подходы. Среди них можно выделить работы О.С. Гуревича и Ф.Д. Гольберга (ЦИАМ), В.Г. Августинювича, Т.А. Кузнецовой, Ю.Н. Хижнякова, И.А. Шмидта (ПНИПУ), С.В. Остапенко, Ю.К. Титова («ОДК-СТАР»), где предлагается применение встроенных математических моделей в САУ ГТД и моделей «виртуальных» датчиков [2–6], цифровых фильтров [7–9], а также рассматриваются перспективы применения теории нечеткой логики и нейронных сетей для создания математических моделей сложных технических объектов двигателестроения [10–13].

Очевидно, что непрерывный промышленный прогресс в области микроэлектроники способствует увеличению вычислительной мощности современных цифровых устройств, что, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию перспективных алгоритмических методов резервирования САУ ГТД, требующих значительных вычислительных затрат и применения сложных математических алгоритмов.

Цель авторов настоящей работы – исследовать возможности, которые дает алгоритмический метод резервирования цифровых каналов измерения САУ ГТД на основе адаптивного фильтра Язвинского.

## Описание алгоритма

В своей более ранней работе [14] авторы предложили метод аналитического резервирования, в котором в качестве дублирующих измерителей параметров ГТД используются оптимальные наблюдатели. Таким наблюдателем является оптимальный фильтр Калмана (ОФК), который позволяет формировать оптимальные оценки вектора состояния и вектора выхода САУ ГТД в реальном времени на основе согласованной с ОФК математической модели САУ, измерений параметров состояния, а также вероятностных характеристик сигналов датчиков и возмущающих воздействий.

ОФК обладает свойством, которое заключается в том, что размерность вектора измерений, поступающих в фильтр, может быть меньше размерности оцениваемого вектора состояния. Это означает, что фильтр способен выполнять свои функции и после отказов датчиков канала измерения САУ ГТД. Таким образом, ОФК

может работать при различных модификациях измерителей, как минимум на одном измерении. При обнаружении отказа датчика необходимо изменить вектор измерений, поступающих в фильтр, и привести в соответствие с ним матрицу измерения и ковариационную матрицу шума измерения.

Использование ОФК для повышения отказоустойчивости САУ ГТД предполагает решение ряда задач:

- идентификация коэффициентов математической модели САУ ГТД;
- согласование оптимального наблюдателя с математической моделью САУ ГТД;
- определение ковариационной матрицы шума возмущения (системы) в реальном времени;
- моделирование алгоритма на различных режимах работы двигателя при нормальном функционировании САУ ГТД и при отказах датчиков канала измерения.

### Идентификация коэффициентов математической модели САУ ГТД

Функционирование САУ ГТД в малой окрестности установившегося движения описывается линейной, дискретной, стохастической моделью [15]:

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \Psi(k)u(k) + \Phi_0(k) + w(k); \\ z(k+1) = H(k+1)x(k+1) + D(k+1)u(k+1) + \\ + H_0(k+1) + v(k+1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x(k)$  – вектор состояния,

$$x(k) = \{n_b(k) \ n_{ВД}(k)\}^T;$$

$u(k)$  – вектор управляющего воздействия,

$$u(k) = \{G_T(k) \ \varphi_{ВНА}(k)\}^T;$$

$z(k)$  – вектор измерений (выхода),

$$z(k) = \{z_1(k) \ z_2(k)\}^T;$$

$z_1(k)$  – вектор прямых измерений вектора состояния,

$$z_1(k) = \{n_b^H(k) \ n_{ВД}^H(k)\}^T;$$

$z_2(k)$  – вектор косвенных измерений,

$$z_2(k) = \{p_{КВД}(k) \ T_{ГНД}(k)\}^T;$$

$w(k)$  – вектор шума возмущения,

$$w(k) = \{w_1(k) \ w_2(k)\}^T;$$

$v(k)$  – вектор шума измерения,

$$v(k) = \{v_1(k) \ v_2(k) \ v_3(k) \ v_4(k)\}^T;$$

$n_b(k)$  и  $n_{ВД}(k)$  – частоты вращения ротора низкого давления (вентилятора) и высокого давления;  $G_T(k)$  – расход топлива;  $\varphi_{ВНА}(k)$  – угол установки входных направляющих аппаратов;  $p_{КВД}(k)$  – давление газа за компрессором;  $T_{ГНД}(k)$  – температура газа за турбиной;  $\Phi$ ,  $\Psi$ ,  $\Phi_0$  – переходные матрицы коэффициентов динамической модели,  $\Phi = \{\varphi_{ij}, i, j = 1, 2\}$ ,  $\Psi = \{\psi_{ij}, i, j = 1, 2\}$ ,  $\Phi_0 = \{\varphi_{0i}, i = 1, 2\}$ ;  $H$ ,  $D$ ,  $H_0$  – матрицы коэффициентов модели измерений,  $H = [H_1 \ H_2]^T$ ,  $D = [D_1 \ D_2]^T$ ,  $H_0 = [H_{01} \ H_{02}]^T$ ;  $H_1 = D_1 = 0$ ;  $H_2 = \{h_{ij}, i, j = 1, 2\}$ ;  $D_2 = \{d_{ij}, i, j = 1, 2\}$ ;  $H_{01} = 0$ ;  $H_{02} = \{h_{0i}, i = 1, 2\}$ .

Каждое из уравнений модели (1) можно записать в матричном виде:

$$y(k) = X(k)v(k) + e(k), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где  $y(k)$  –  $n$ -вектор отклика, состоящий из измеренных значений сигнала выхода;  $X(k)$  – матрица регрессоров размера  $(n, m)$ , состоящая из измеренных значений сигналов входа;  $v(k)$  – вектор коэффициентов размера  $(m+1)$ ;  $e(k)$  –  $n$ -вектор ошибок (помехи);  $n$  – число измеренных значений сигналов;  $m$  – количество сигналов входа.

Для формирования оптимальных оценок коэффициентов модели (2) в реальном времени используется матричный алгоритм метода наименьших квадратов (МНК) в движущемся окне [15]:

$$\hat{v}(k) = [X^T(k)X(k)]^{-1} X^T(k)y(k), \quad k = 1, s, \quad (3)$$

где  $\hat{v}(k) = \{\hat{v}_0(k) \ \hat{v}_1(k) \dots \ \hat{v}_m(k)\}^T$ ;  $s$  – ширина движущегося окна.

Полученные в результате идентификации матрицы коэффициентов  $\Phi(k)$ ,  $\Psi(k)$ ,  $\Phi_0(k)$ ,  $H(k)$ ,  $D(k)$ ,  $H_0(k)$  модели (1) являются исходными для моделирования ОФК.

### Алгоритм адаптивного фильтра Язвинского

ОФК не позволяет определять ковариационную матрицу шума возмущения ( $Q(k)$ ) в реальном времени, при его использовании необходимо предварительно проводить корреляционный анализ системных и измерительных шумов. В отличие от ОФК адаптивный фильтр Язвинского позволяет определять матрицу  $Q(k)$  в реальном времени, что защищает фильтр от потери устойчивости и, следовательно, обеспечивает стабильность оценок вектора выхода САУ ГТД [16].

Алгоритм адаптивного фильтра Язвинского имеет следующий вид [14; 17]:

$$\hat{x}(k+1/k) = \Phi \hat{x}(k/k) + \Psi u(k) + \Phi_0;$$

$$v(k+1) = z(k+1) - H \hat{x}(k+1/k);$$

$$Q = \begin{cases} \hat{Q}(k+1), & \text{если } \hat{Q}(k+1) > 0; \\ 0, & \text{если } \hat{Q}(k+1) \leq 0 \end{cases};$$

$$P(k+1/k) = \Phi P(k/k) \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T;$$

$$K(k+1) = P(k+1/k) H^T [H P(k+1/k) H^T + R]^{-1};$$

$$P(k+1/k+1) = [E - K(k+1)H] P(k+1/k);$$

$$\hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K(k+1)v(k+1). \quad (4)$$

Вычисление матрицы  $Q(k)$ :

$$\hat{Q}(k+1) = \frac{1}{[(H\Gamma)^T H\Gamma]^2} \left[ (H\Gamma)^T [v^*(k+1)v^{*T}(k+1) - H\Phi P(k/k)\Phi^T H^T - R(k+1)] H\Gamma \right]. \quad (5)$$

Выражения (3)–(5) составляют алгоритм обеспечения информационной избыточности канала измерения САУ ГТД на основе оптимального наблюдателя, адаптивного фильтра Язвинского, позволяющего формировать оптимальные оценки вектора выхода САУ ГТД в реальном времени.

Предлагаемый алгоритм может выполнять свои функции как при нормальном функционировании двигателя, так и при отказах датчиков канала измерения.

## Моделирование алгоритма

Моделирование алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД проведено на основе данных летных испытаний двигателя ПС-90А. Алгоритм реализован в программной среде MATLAB. Применялась аппаратная платформа со следующими параметрами: процессор Intel Core i7 2,67 ГГц, ОЗУ 12 Гб, реализуемый алгоритм размером 10 Кб. Алгоритм моделировался

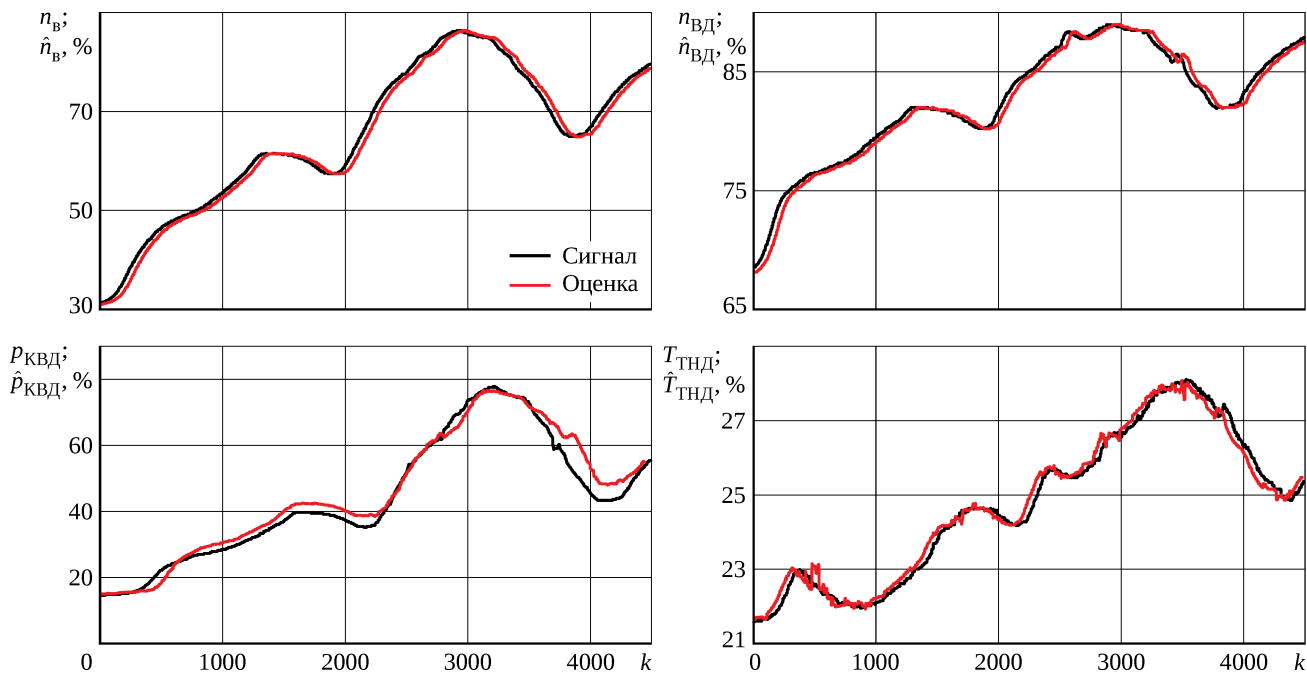


Рис. 3. Графики изменения параметров ТРДД на переходном режиме (малый газ – 0,3 – 0,7 – 0,3 номинального)

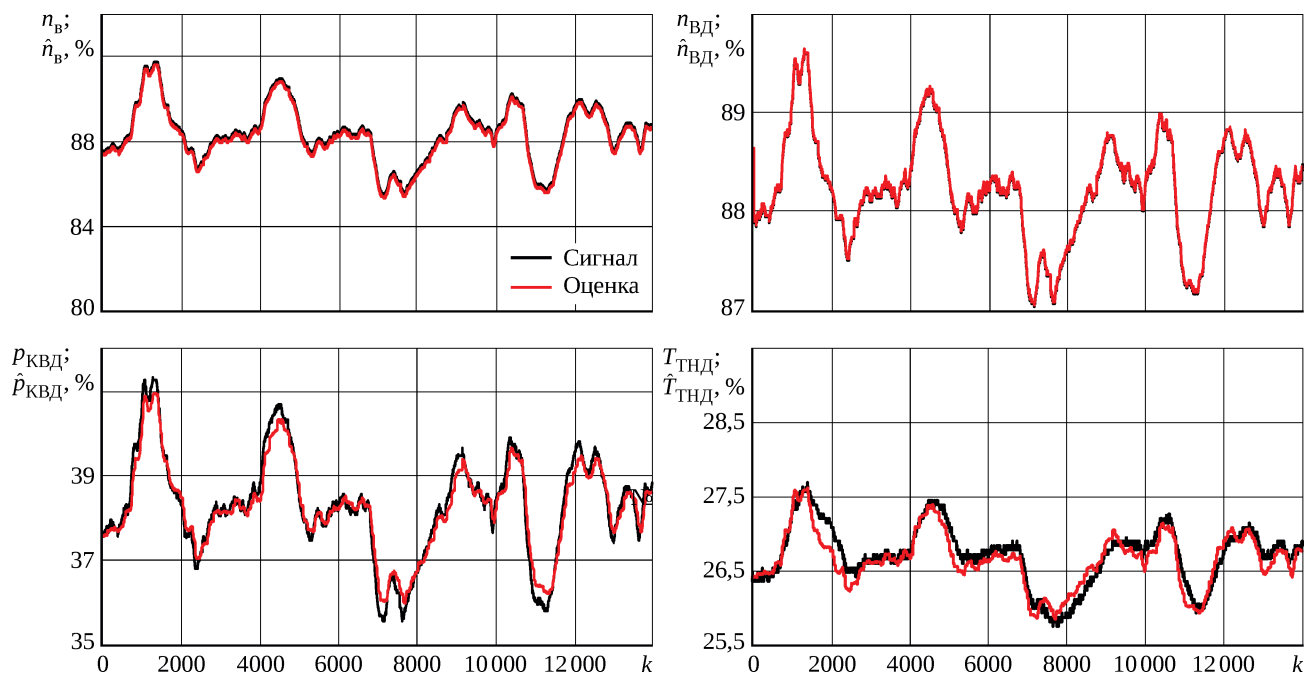


Рис. 4. Графики изменения параметров ТРДД на крейсерском режиме

при отказе параметров давления воздуха за компрессором высокого давления ( $p_{\text{КВД}}$ ) и температуры газов ( $T_{\text{ТНД}}$ ).

На рис. 3 и рис. 4 показаны процессы изменения сигналов выхода САУ ГТД и соответствующие оптимальные оценки, полученные с помощью фильтра Язвинского, на переходном и стационарном режимах работы двигателя. Параметры двигателя указаны в процентах от максимальных значений,  $k$  – номер измерений.

Анализ результатов моделирования показал качественную оценку фильтрации, которая соответствует измеренным величинам. На переходном режиме работы ГТД ошибка для параметров  $n_v$  и  $n_{\text{ВД}}$  составляет 0,5...1,0%, для параметра  $p_{\text{КВД}} - 1...3\%$ , для параметра  $T_{\text{ТНД}} - 2...5\%$ . На стационарном режиме ошибка для параметров  $n_v$  и  $n_{\text{ВД}}$  составляет 0,5...1,0%, для параметра  $p_{\text{КВД}} - 0,8...1,5\%$ , для параметра  $T_{\text{ТНД}} - 1,1...2\%$ .

В дальнейших исследованиях авторы предполагают испытать предложенный алгоритм обеспечения отказоустойчивости САУ на стенде полунатурного моделирования АО «ОДК-Авиадвигатель» с использованием технологий модельно-ориентированного проектирования в различных конфигурациях работы фильтра и выбрать алгоритм определения отказов датчиков [18; 19]. В качестве объекта исследования планируется использовать САУ авиационного двигателя пятого поко-

ления ПД-14 для семейства российских самолетов типа МС-21. Типовыми возмущениями станут разовые постоянные и кратковременные обрывы линий связи основных датчиков САУ на переходном режиме «полетный малый газ – взлетный режим» и других режимах с различной скоростью перемещения рычага управления двигателем.

## Заключение

Предлагаемый алгоритмический метод резервирования позволяет получать дополнительную информацию о состоянии САУ в процессе работы авиационного двигателя по следующим параметрам: частота вращения компрессоров низкого и высокого давления, давление воздуха за компрессором двигателя, температура газа за турбиной двигателя.

Метод обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД включает алгоритм рекуррентной идентификации математической модели и согласованный с моделью адаптивный фильтр Язвинского. Этот метод обеспечивает получение адекватной математической модели и формирование оптимальных оценок вектора выхода САУ ГТД в реальном времени.

Планируются дополнительные исследования на стенде полунатурного моделирования.

## Литература

1. Авиационный двигатель ПС-90А / Иноземцев А.А., Нерадько А.В., Коняев Е.А., Медведев В.В. и др. ; под ред. А.А. Иноземцева. М. : Физматлит, 2007. 320 с.
2. Управление органами механизации компрессора газотурбинного двигателя с использованием его математической модели / Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Зуев С.А., Бусурин В.И. // Труды МАИ : сетевое научное издание. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80218>.
3. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Математическая модель двигателя в САУ ГТД для повышения надежности и качества управления // Труды МАИ : электрон. журн. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30951>.
4. Цифровая электронная система управления с встроенной полной термогазодинамической математической моделью газотурбинного двигателя и авиационный газотурбинный двигатель : заявка на изобрет. RU 2013143479/08 А / Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д. ; заявитель Центр. ин-т авиац. моторостроения им. П.И. Баранова. Заявл. 26.09.2013 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
5. Остапенко С.В. Интеллектуальный двигатель : доклад на пленарном заседании XXIII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2022» (АКТТИ-2022). Пермь, 2022.
6. Линейная адаптивная бортовая математическая модель двигателя для повышения надежности систем автоматического управления авиационным ГТД / В.Г. Августинович, Т.А. Кузнецова, А.Д. Куракин, А.И. Фатыков, А.П. Якушев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2015. № 42. С. 47–60.
7. Августинович В.Г., Кузнецова Т.А. Повышение надежности систем автоматического управления газотурбинными двигателями с применением алгоритмических методов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 9. С. 68–77.
8. Кузнецова Т.А., Августинович В.Г., Губарев Е.А. Алгоритмы диагностики и парирования отказов каналов изменения системы автоматического управления авиационным двигателем // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 16. С. 5–14.

- 
9. Августинovich В.Г., Кузнецова Т.А. Алгоритмы валидации входной информации бортовой математической модели, встроенной в систему автоматического управления авиационного двигателя // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13, № 9. С. 19–26.
  10. The fuzzy logic in the problems of test control of a bypass turbojet engine gas generator / A. Inozemtsev, A. Petrochenkov, V. Kazantsev, I. Schmidt, A. Sazhenkov, D. Dadenkov, I. Gribkov, P. Ivanov // Mathematics. 2022. Vol. 10, no. 3. Art. 484. 17 p.
  11. Разработка адаптивного нейро-нечеткого регулятора частоты вращения вентилятора ТРДД / Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 2. С. 47–50.
  12. Кузнецова Т.А., Августинovich В.Г. Применение нейронной сети для диагностики отказов датчиков каналов обратной связи САУ ГТД // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 4. С. 131–133.
  13. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Перм. нац. исследоват. политехн. ун-та, 2013. 160 с.
  14. Аналитическое резервирование в системе автоматического управления авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя на основе оптимальных наблюдателей / А.А. Иноземцев, Н.Г. Ламанова, А.С. Плешивых, И.Н. Грибков, А.Н. Саженов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2 (226). С. 65–78.
  15. Идентификация математической модели системы автоматического управления газотурбинного двигателя / Н.Г. Ламанова, А.С. Плешивых, И.Н. Грибков, А.И. Фатыков // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 31. С. 121–135.
  16. Синтез оптимального наблюдателя при отсутствии априорной информации о характеристиках шума возмущения системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя / А.А. Иноземцев, Н.Г. Ламанова, А.Н. Саженов, И.Н. Грибков, А.С. Плешивых // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2020. № 63. С. 70–79.
  17. Синтез оптимального наблюдателя при отказах в канале измерения систем автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя / А.А. Иноземцев, Н.Г. Ламанова, А.Н. Саженов, И.Г. Лисовин, И.Н. Грибков, А.С. Плешивых // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 57. С. 162–171.
  18. Плешивых А.С., Заборских А.А., Фатыков А.И. Стенд для испытаний электронной части систем автоматического управления газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 22. С. 90–102.
  19. Способ исследования электронных систем управления сложными техническими объектами и стенд для исследования электронных систем управления сложными техническими объектами : патент RU 2789850 С1 / Грибков И.Н., Лисовин И.Г. ; патентообладатель АО «ОДК-Авиадвигатель. Заявка № 2022120123, 22.07.2022 ; опубл. 14.02.2023, Бюл. № 5.

## References

1. Inozemtsev A.A., Neradko A.V., Konyaev E.A., Medvedev V.V., et al. Aviatsonnyi dvigatel' PS-90A [Aviation engine PS-90A] edited by A.A. Inozemtsev. Moscow: Fizmatlit, 2007. 320 p.
  2. Gurevich O.S., Gol'berg F.D., Zuev S.A., Busurin V.I. Upravlenie organami mekhanizatsii kompressora gazoturbinnogo dvigatel'ia s ispol'zovaniem ego matematicheskoi modeli [Compressor mechanization control of gas-turbine engine using his simulation model]. Trudy MAI [Proceedings of MAI]: network scientific periodic publication. 2017. No. 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80218>.
  3. Gol'berg F.D., Gurevich O.S., Petukhov A.A. Matematicheskaiia model' dvigatel'ia v SAU GTD dlia povysheniia nadezhnosti i kachestva upravleniia [A mathematical model of the engine in ACS GTE for increasing of safety and quality control]. Trudy MAI [Proceedings of MAI]: network scientific periodic publication. 2012. No. 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30951>.
  4. Gurevich O.S., Gol'berg F.D. Tsifrovaia elektronnaia sistema upravleniia s vstroennoi polnoi termogazodinamicheskoi matematicheskoi model'iu gazoturbinnogo dvigatel'ia i aviatsonnyi gazoturbinni dvigatel' [Digital electronic control system with built-in complete thermo- and gas-dynamic mathematical model of gas turbine engine, and aircraft gas turbine engine]: application for invention RU 2013143479/08 A; applicant – Central Institute of Aviation Motors. Date of application – 26.09.2013; published on 10.04.2015, bulletin no. 10.
-

- 
5. Ostapenko S.V. *Intellektual'nyi dvigatel'* [The Intelligent Engine]: report at the plenary session of the XXIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Aerospace Engineering, High Technologies and Innovations – 2022" (AEHTI-2022). Perm, 2022.
  6. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Kurakin A.D., Fatykov A.I., Yakushev A.P. Lineinaiia adaptivnaia bortovaia matematicheskaia model' dvigatel'ia dlia povysheniia nadezhnosti sistem avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnym GTD [Linear adaptive on-board engine model as way to enhance full authority digital engine control]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaia tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2015. No. 42. P. 47–60.
  7. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A. Povysheenie nadezhnosti sistem avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnymi dvigatel'iami s primeneniem algoritmicheskikh metodov [Enhancement of gas-turbine engine control reliability using algorithmic procedures]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2015. Vol. 326, no. 9. P. 68–77.
  8. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Gubarev E.A. Algoritmy diagnostiki i parirovaniia otkazov kanalov izmereniia sistema avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnym dvigatelem [The algorithms of measuring channels' fault diagnostics and counteraction for automatic control system of aero-engines]. *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia* [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems]. 2015. No. 16. P. 5–14.
  9. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A. Algoritmy validatsii vkhodnoi informatsii bortovoi matematicheskoi modeli, vstroennoi v sistemu avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnogo dvigatel'ia [The input informations' validation algorithms for on-board mathematical model built-in automatic control system of aircraft engine]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy* [Information-measuring and Control Systems]. 2015. Vol. 13, no. 9. P. 19–26.
  10. The fuzzy logic in the problems of test control of a bypass turbojet engine gas generator / A. Inozemtsev, A. Petrochenkov, V. Kazantsev, I. Shmidt, A. Sazhenkov, D. Dadenkov, I. Gribkov, P. Ivanov // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 3. Art. 484. 17 p.
  11. Titov Yu.K., Filippenkov R.G., Khizhnyakov Yu.N., Yuzhakov A.A. Razrabotka adaptivnogo neuro-nechetkogo regulatora chastoty vrashcheniia ventilatora TRDD [Development of adaptive neuro-fuzzy regulator of the turbofan's fan speed]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics]. 2013. No. 2. P. 47–50.
  12. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G. Primenenie neuronnoi seti dlia diagnostiki otkazov datchikov kanalov obratnoi svyazi SAU GTD [The neural network application for fault diagnostics of feedback channels' sensor in automatic control systems of modern aircraft gas-turbine engines]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia* [Scientific and Technical Volga region Bulletin]. 2017. No. 4. P. 131–133.
  13. Khizhnyakov Yu.N. *Algoritmy nechetkogo, neuronnogo i neuro-nechetkogo upravleniia v sistemakh real'nogo vremeni* [Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems]: textbook. Perm: Publishing house of Perm National Research Polytechnic University, 2013. 160 p.
  14. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Pleshivykh A.S., Gribkov I.N., Sazhenkov A.N. Analiticheskoe rezervirovanie v sisteme avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnogo turboreaktivnogo dvukhkонтурного dvigatel'ia na osnove optimal'nykh nabludatelei [Analytical redundancy in the automatic control system of an aircraft turbojet bypass engine based on optimal observers]. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. 2022. No. 2 (226). P. 65–78.
  15. Lamanova N.G., Pleshivich A.S., Gribkov I.N., Fatykov A.I. Identifikatsiia matematicheskoi modeli sistema avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnogo dvigatel'ia [Identification of the mathematical model of the automatic control system of a gas turbine engine]. *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia* [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems]. 2019. No. 31. P. 121–135.
  16. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Sazhenkov A.N., Gribkov I.N., Pleshivikh A.S. Sintez optimal'nogo nabludatel'ia pri otsutstvii apriornoj informatsii o kharakteristikakh shuma vozmushcheniia sistema avtomaticheskogo upravleniia i kontrol'ia turboreaktivnogo dvukhkонтурного dvigatel'ia [Synthesis of the optimal observer in the absence of apriori information about the noise characteristics of the automatic control and monitoring system of a turbofan engines]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaia tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2020. No. 63. P. 70–79.
  17. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Sazhenkov A.N., Lisovin I.G., Gribkov I.N., Pleshivikh A.S. Sintez optimal'nogo nabludatel'ia pri otkazakh v kanale izmereniia sistema avtomaticheskogo upravleniia i kontrol'ia turboreaktivnogo dvukhkонтурного dvigatel'ia [Optimal observer synthesis for failures in measurement channel of bypass turbofan engines ACS]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaia tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2019. No. 57. P. 162–171.
-

- 
18. Pleshivich A.S., Zaborskikh A.A., Fatykov A.I. Stend dlia ispytaniia elektronnoi chasti sistem avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnogo dvigatel'ia [Test bench for testing electronics of gas turbine engine automatic control system]. Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems]. 2017. No. 22. P. 90–102.
  19. Gribkov I.N., Lisovin I.G. Sposob issledovaniia elektronnykh sistem upravleniia slozhnymi tekhnicheskimi ob"ektami i stend dlia issledovaniia elektronnykh sistem upravleniia slozhnymi tekhnicheskimi ob"ektami [Method for studying electronic control systems of complex technical objects and a test bench for studying electronic control systems of complex technical objects]. Patent RU 2789850 C1. Proprietor: Aktsionerhoe obshchestvo "ODK-Aviadvigatel". Application no. 2022120123, 22.07.20224; date of publ. 14.02.2023, Bull. no. 5.

*Материалы получены редакцией 18.05.2023*