

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья
УДК 681.5.015.44
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185655>
EDN: <https://www.elibrary.ru/YGCKET>

АПРОБАЦИЯ АДАПТИВНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ БОЛЬШОЙ ТЯГИ

**Александр Александрович Иноземцев¹, Артур Сергеевич Плешивых²✉,
Алексей Николаевич Саженов³, Владимир Павлович Первадчук⁴,
Надежда Геннадьевна Ламанова⁵, Иван Алексеевич Васкецов⁶**

^{1,2,3,6}АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК»), Пермь,
Россия

^{1,2,4,5,6}Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
ПНИПУ, Пермь, Россия

^{1,3}office@avid.ru

²arthur.p.s.1995@mail.ru✉

⁴pervadchuk@mail.ru

⁵nglaman@mail.ru

⁶ivanvask1@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты натурных испытаний адаптивного наблюдателя на базе фильтра Язвинского в системе турбореактивного двухконтурного двигателя пятого поколения большой тяги 35 тс.

Для проведения исследований создана и отлажена математическая модель адаптивного наблюдателя с последующей интеграцией в информационно-измерительное стендовое оборудование. Адаптивный алгоритм формирования информационной избыточности включает алгоритм идентификации математической модели САУ ТРДД и алгоритм оптимального наблюдателя, генерирующего оптимальные оценки параметров вектора выхода САУ ТРДД в реальном масштабе времени. Программный код апробированного адаптивного наблюдателя создан на языке C++ и его размер составил 38 Кб. Частота опроса параметров информационно-измерительной системой стенда составляет 10 Гц.

Работа проведена на современном, специализированном и аттестованном оборудовании, работающем в реальном масштабе времени. Для обеспечения безопасности испытаний двигателя апробация метода выполнялась в наблюдательном режиме, т.е. без возможности управления адаптивным наблюдателем системами стенда и двигателя.

Оцениваемые при помощи адаптивного наблюдателя вектор выхода системы автоматического управления двигателя включает следующие двигательные параметры: частота вращения ротора компрессора низкого давления n_B , частота вращения ротора компрессора высокого давления n_K , давление воздуха за компрессором высокого давления P_K , температура газа за турбиной низкого давления T_T .

Проверка алгоритмического метода резервирования на основе фильтра Язвинского подтвердила возможность работы в составе электронных агрегатов САУ

и К ТРДД с приемлемыми показателями точности в статике. Максимальное смещение не превышает $|0.008|$ % на исследованных установившихся режимах работы.

Экспериментальная проверка алгоритмического метода резервирования на базе фильтра Язвинского выполнена в авиадвигателестроении РФ впервые.

По результатам испытаний сформированы направления дальнейших исследований, которые предусматривают исследование адаптивного наблюдателя на динамических режимах работы турбореактивного двухконтурного двигателя (приёмистости, сбросы, встречные приёмистости, уход на второй круг) и при физических отказах датчиков двигательных параметров: частота вращения ротора компрессора низкого давления n_B , частота вращения ротора компрессора высокого давления n_K , давление воздуха за компрессором высокого давления P_K , температура газа за турбиной низкого давления T_T на входе в расчетный алгоритм.

Ключевые слова: авиационный двигатель, двигатель-демонстратор технологий, электронный регулятор двигателя, алгоритмическое резервирование, математическая модель, отказоустойчивость, оптимальный наблюдатель, фильтр Калмана, фильтр Язвинского

Для цитирования: Иноземцев А.А., Плешивых А.С., Саженов А.Н., Первадчук В.П., Ламанова Н.Г., Васкецов И.А. Апробация адаптивного наблюдателя двигательных параметров в составе информационно-измерительной системы при испытаниях авиационного двигателя большой тяги // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185655>

Original article

TESTING OF AN ADAPTIVE ENGINE PARAMETERS OBSERVER AS PART OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM IN THE PROCESS OF HIGH-THRUST AIRCRAFT ENGINE TESTING

Alexander A. Inozemtsev¹, Artur S. Pleshivkyh²✉, Aleksey N. Sazhenkov³, Vladimir P. Pervadchuk⁴, Nadezhda G. Lamanova⁵, Ivan A. Vasketsov⁶

^{1,2,3,6}JCS «UEC-Aviadvigatel», Perm, Russia

^{1,2,4,5,6}Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

^{1,3}office@avid.ru

²arthur.p.s.1995@mail.ru ✉

⁴pervadchuk@mail.ru

⁵nglaman@mail.ru

⁶ivanvask1@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of full-scale tests of an adaptive observer based on the Yazvinsky filter in the system of a fifth-generation turbofan engine with a high thrust of 35 tf.

To conduct the research, a mathematical model of the adaptive observer was formed with subsequent integration into the information and measuring bench equipment. The adaptive algorithm for generating information redundancy includes an algorithm for identifying the mathematical model of the turbofan engine ACS and an algorithm for an optimal observer that generates optimal estimates of the parameters of the turbofan engine ACS output vector in real time. The program code of the tested adaptive observer was

created in C++ and its size was 38 KB. The frequency of polling the measured input parameters of the Yazvinsky filter and the frequency of issuing calculated estimates is 10 Hz.

The work was carried out on modern, specialized and certified equipment operating in real time. To ensure the safety of engine tests, the method was tested in the observation mode, i.e. without the ability to control the adaptive observer by the bench and engine systems. The output vector of the engine automatic control system estimated using the adaptive observer includes the following engine parameters: low-pressure compressor rotor speed n_B , high-pressure compressor rotor speed n_K , air pressure behind the high-pressure compressor P_K , and gas temperature behind the low-pressure turbine T_T .

Testing the algorithmic backup method based on the Yazvinsky filter confirmed its ability to operate as part of a digital turbofan engine ACS with acceptable accuracy indicators in statics. In the studied steady-state operating modes from idle to takeoff mode, the maximum offset does not exceed $|0.008|$ %.

Experimental testing of the algorithmic backup method based on the Yazvinsky filter was performed for the first time in the Russian aircraft engine industry.

Based on the test results, directions for further research have been formed, which include the study of an adaptive observer in dynamic operating modes of a turbojet two-circuit engine (acceleration, discharges, counter-acceleration, go-around) and in case of physical failures of the engine parameter sensors: low-pressure compressor rotor speed n_B , high-pressure compressor rotor speed n_K , air pressure behind the high-pressure compressor

P_K , gas temperature behind the low-pressure turbine T_T at the inlet to the calculation algorithm.

Keywords: aircraft engine, technology demonstrator engine, electronic engine controller, algorithmic redundancy, mathematical model, fault tolerance, optimal observer, Kalman filter, Yazvinsky filter

For citation: Inozemtsev A.A., Pleshivykh A.S., Sazhenkov A.N., Pervadchuk V.P., Lamanova N.G., Vasketsov I.A. Testing of an adaptive engine parameters observer as part of the information and measurement system in the process of high-thrust aircraft engine testing. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185655>

Введение

Создание нового поколения авиационных двигателей требует опережающей разработки инновационных технологий в области систем автоматического управления и контроля (САУ и К). Эти технологии могут включать: формирование новой идеологии и структуры построения системы, воплощение высокопроизводительных вычислительных методов, создание высокоэффективных программ и законов управления, реализацию алгоритмов управления силовой установкой как по отдельным расчетным параметрам, так и на основе встроенной бортовой математической модели двигателя; использование высокоточных датчиков на новых физических принципах и т.д.

Ряд вышеуказанных тенденций неизбежно приводит к усложнению САУ, что повышает вероятность возникновения отказов, непосредственно влияющих на качество управления. При этом требования к надежности электронных САУ неуклонно повышаются, а в некоторых случаях и кардинально ужесточаются в связи с отсутствием резервного гидромеханического регулятора. Таким образом, решение задач надежности и отказоустойчивости САУ является ключевым при создании авиационных двигателей следующих поколений.

Для реализации требуемых показателей надежности САУ, в дополнение к аппаратному резервированию, учеными и специалистами ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», АО «ОДК-Авиадвигатель», ФГАО ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГАО ВО «Уфимский университет науки и технологий» и др. предлагаются различные алгоритмические методы обеспечения отказоустойчивости электронных систем управления [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7, 24], в том числе за счет информационной избыточности на основе математической модели адаптивного наблюдателя двигательных параметров [9, 10].

Так, ранее в авторских работах была представлена численная оценка функционирования оптимального многомерного фильтра Калмана и фильтра Язвинского, согласованных с математической моделью САУ турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) типа ПС-90А в условиях полета на Ту-214. В частности, проведен анализ качества (точности, быстродействия) полученных оценок

вектора выхода САУ ТРДД и расчетами было показано, что предложенный алгоритм обеспечивает выполнение требований по достоверности оценок вектора выхода.

Однако все вышеуказанные научные работы носят чисто теоретический характер и не имеют экспериментального подтверждения эффективности работы в реальном масштабе времени. В настоящее время данный недостаток был снят частично при проведении проверки нового алгоритма в условиях стендовых испытаний двигателя-демонстратора технологий пятого поколения большой тяги 35 тс разработки АО «ОДК-Авиадвигатель».

Цель статьи – проинформировать научную общественность о первичных результатах экспериментальной проверки работы адаптивного наблюдателя двигательных параметров на базе фильтра Язвинского в системе авиационного двигателя большой тяги.

1. Математическая модель создания информационной избыточности каналов САУ

Использование метода создания информационной избыточности для повышения отказоустойчивости САУ ТРДД предполагает решение ряда задач, которые рассматривались как самостоятельные в работах [11, 12]. К ним относятся:

- идентификация коэффициентов математической модели (ММ) САУ ТРДД в реальном масштабе времени;
- согласование оптимального наблюдателя с математической моделью САУ ТРДД и его моделирование при нормальном функционировании САУ ТРДД.

Для исследования математической модели адаптивного наблюдателя применяются следующие входные измеренные параметры САУ как основные параметры контуров управления ТРДД:

- n_b – частота вращения ротора низкого давления;
- n_k – частота вращения ротора высокого давления;
- G_T – расчетный расход топлива в камеру сгорания;
- $h_{вна}$ – положение штока гидроцилиндра входного направляющего аппарата компрессора высокого давления;
- P_K – давление воздуха за компрессором высокого давления;
- T_T – температура газов за турбиной низкого давления.

Данные переменные формируют линейную, дискретную, стохастическую математическую модель САУ ТРДД в виде системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} n_b(k+1) = \phi_{11}n_b(k) + \phi_{12}n_k(k) + \psi_{11}G_T(k) + \psi_{12}h_{вна}(k) + \phi_{01} + W_1(k), \\ n_k(k+1) = \phi_{21}n_b(k) + \phi_{22}n_k(k) + \psi_{21}G_T(k) + \psi_{22}h_{вна}(k) + \phi_{02} + W_2(k), \\ P_K(k+1) = h_{11}n_b(k+1) + h_{12}n_k(k+1) + d_{11}G_T(k+1) + d_{12}h_{вна}(k+1) + h_{01} + V_1(k+1), \\ T_T(k+1) = h_{21}n_b(k+1) + h_{22}n_k(k+1) + d_{21}G_T(k+1) + d_{22}h_{вна}(k+1) + h_{02} + V_2(k+1). \end{cases} \quad (1)$$

или в векторно-матричной форме:

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi x(k) + \Psi u(k) + \Phi_0 + w(k) \\ z(k+1) = Hx(k+1) + Du(k+1) + H_0 + v(k+1) \end{cases} \quad (2)$$

Адаптивный алгоритм формирования информационной избыточности в САУ ТРДД включает алгоритм идентификации ММ (1) в реальном масштабе времени и алгоритм оптимального наблюдателя, генерирующего оптимальные оценки параметров вектора выхода САУ ТРДД в реальном времени.

Идентификация ММ проводится по методу наименьших квадратов (МНК) в движущемся окне в реальном масштабе времени, ширина окна $S = 100$ измерений со сдвигом на одно измерение вправо.

Используется матричный алгоритм МНК в движущемся окне

$$\hat{v}(k) = (X(k)^T X(k))^{-1} X^T(k) Y(k), \quad k = 1, S, \quad (3)$$

где S – ширина движущегося окна;

$\hat{v}(k)$ – вектор оценок коэффициентов ММ (1).

В качестве оптимального наблюдателя, согласованного с ММ (2), используется адаптивный фильтр Язвинского, который представляет собой фильтр Калмана, включающий процедуру вычисления ковариационной матрицы системного шума $Q(k)$ в реальном времени

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}(k+1/k) = \Phi \hat{x}(k/k) + \Psi u(k) + \Phi_0, \\ v(k+1) = z(k+1) - H \hat{x}(k+1/k), \\ Q = \begin{cases} \hat{Q}(k+1), & \text{если } \hat{Q}(k+1) > 0 \\ 0, & \text{если } \hat{Q}(k+1) \leq 0 \end{cases}, \\ P(k+1/k) = \Phi P(k/k) \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T \\ K(k+1) = P(k+1/k) H^T [H P(k+1/k) H^T + R(k+1)]^{-1} \\ P(k+1/k+1) = [E - K(k+1) H] P(k+1/k) \\ \hat{x}(k+1/k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K(k+1) v(k+1) \end{array} \right. \quad (4),$$

где ковариационная матрица шума возмущения вычисляется:

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

Возможность вычисления матрицы $Q(k)$ в реальном времени позволяет защитить фильтр Калмана от расхождения [9, 10, 16, 17].

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 каналов измерения САУ ТРДД. Расчетные оценки, полученные на выходе фильтра Язвинского, используются для парирования отказов, т.е. для замены показаний отказавших датчиков [20, 21, 22, 23].

Таким образом, изложенный алгоритм формирования информационной избыточности в САУ ТРДД образует метод аналитического резервирования измерений двигательных параметров, таких как: n_B , n_K , P_K , T_T . Наибольший практический интерес представляет задача парирования отказов измерительных каналов n_B , n_K , т.к. именно по этим параметрам осуществляется основное управление тягой ТРДД, и выход из строя этих каналов приводит к резервному управлению, которое имеет ряд ограничений, а применительно к системе FADEC (*Full Authority Digital Engine Control system*) это означает последующее выключение двигателя [18, 25].

2. Объект испытаний. Условия и методика проведения испытаний

Экспериментальную апробацию алгоритма адаптивного наблюдателя проводили в процессе натурных испытаний двигателя-демонстратора технологий (ДДТ) пятого поколения большой тяги 35 тс ($H = 0$, $M = 0$). Испытания осуществляли в диапазоне режимов работы ДДТ от малого газа до взлетного режима с уровнем тяги $R = 35$ тс.

Проверка функционирования адаптивного наблюдателя, согласованного с математической моделью САУ ТРДД, в реальном масштабе времени и в системе ТРДД проводилась впервые в РФ.

ДДТ пятого поколения большой тяги 35 тс представляет собой турбореактивный двухконтурный двигатель со сверхвысокой степенью двухконтурности $m = 11$, с отдельным истечением газов из внешнего и внутреннего контуров, с прямым приводом вентилятора и реверсом тяги в наружном контуре [13, 14].

Конструктивный облик ДДТ пятого поколения большой тяги 35 тс представлен на рисунке 1

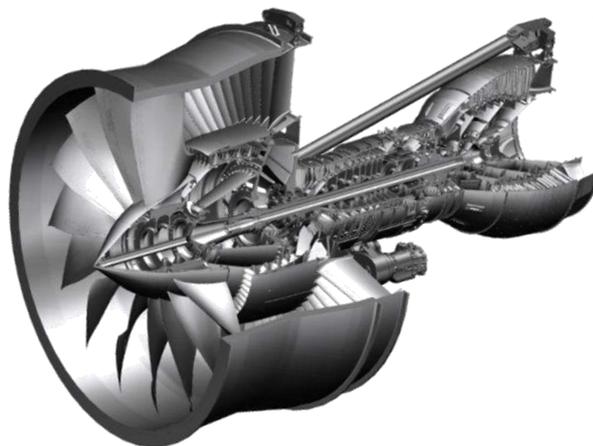


Рисунок 1 – Конструктивный вид ДДТ [13]

Размещение ДДТ на испытательном стенде представлено на рисунке 2



Рисунок 2. Двигатель-демонстратор технологий на открытом испытательном стенде (д. Фролы, г. Пермь)

На двигателе-демонстраторе технологий реализована электронная цифровая система автоматического управления с полной ответственностью типа FADECs. В качестве электронного регулятора двигателя применен электронный регулятор РЭД-35, который представляет собой специализированный многопроцессорный цифровой вычислительный комплекс, работающий в реальном масштабе времени.

РЭД-35 на основе полученной входной информации и в соответствии с заложенными программами обеспечивает управление расходом топлива в камере сгорания двигателя, управление механизацией компрессора и т.д., что и обеспечивает в конечном итоге необходимый уровень реактивной тяги двигателя, его топливную эффективность и устойчивую работу.

Электронная цифровая система автоматического управления ДДТ пятого поколения большой тяги 35 тс фактически представляет собой дальнейшее развитие

САУ ТРДД пятого поколения средней тяги 14 тс для магистральных самолетов МС-21-310 [19].

Для текущего контроля и оценки работы САУ-35 кодовая информация из электронного регулятора поступает в стендовую информационно-измерительную систему по каналу пульта резервного контроля согласно ГОСТ 18977-79 и РТМ 1495-75 с изменением 3 (ARINC- 429). Скорость передачи информации – 100 кбод, частота выдачи информации не менее 50 Гц. Информационно-измерительная система стенда разработана в [НПП «Мера»](#).

Структурная схема, иллюстрирующая управление двигателя, технологию регистрации параметров, а также реализацию исследуемого алгоритма представлена на рисунке 3

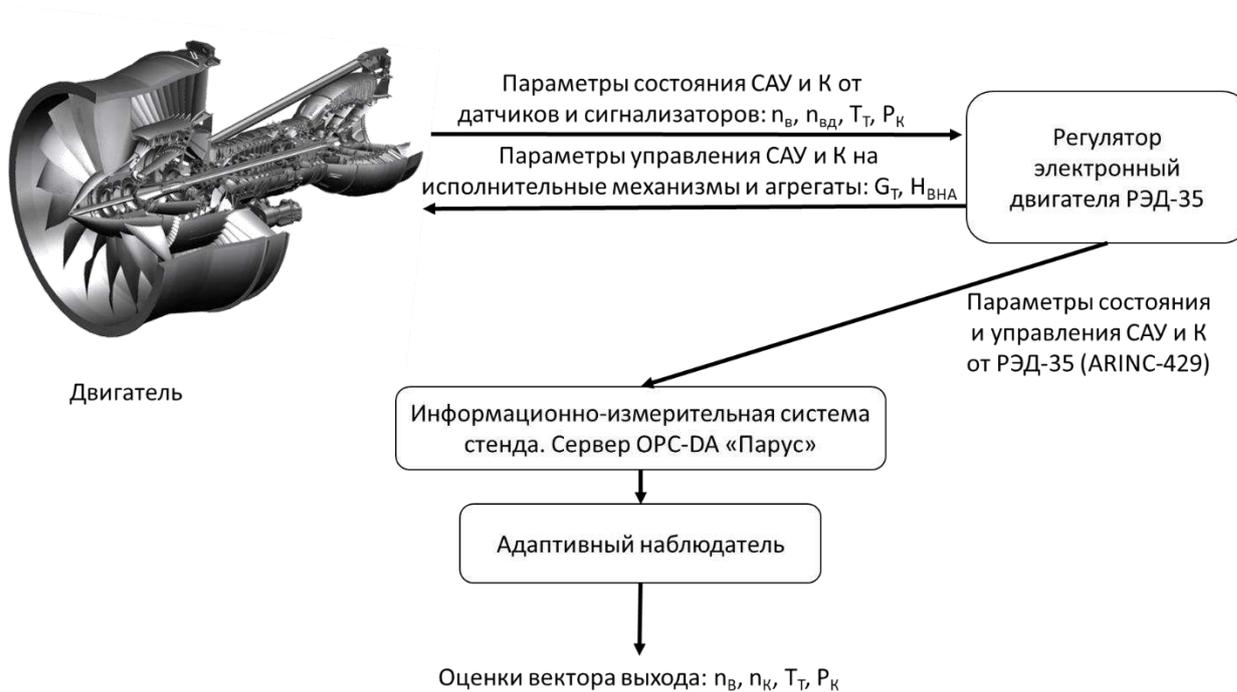


Рисунок 3. Блок-схема управления ДДТ-35 и формирования расчетных оценок адаптивным наблюдателем

Для обеспечения безопасности испытаний двигателя апробацию метода выполняли в наблюдательном режиме, т.е. без возможности управления адаптивным наблюдателем системами стенда и двигателя.

Алгоритм информационной избыточности реализован в составе информационно-измерительной системы стенда. Программная реализация предложенных алгоритмов выполнена в составе аппаратной платы интерфейса ARINC-429 с использованием программного пакета «Парус». Система «Парус» является программным пакетом, предназначенным для обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, регистрации, отображения информации об объекте или управления им.

Данные в «ПАРУС» поступают из РЭД-35 на плату ARINC-429 с помощью протокола OPC-DA (Data Access). Частота опроса параметров системой «ПАРУС» составляет 10 Гц.

Внешний вид одной из стоек информационно-управляющей аппаратуры стенда представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. Стойка с размещенными в ней промышленными компьютерами испытательного стенда

Программа реализации исследуемого алгоритма выполнена на промышленном компьютере со следующими техническими характеристиками: центральный процессор – Intel core i3-10100, оперативная память – 16 Гб, операционная система – windows 10. Частота опроса измеряемых входных параметров и частота выдачи расчетных оценок составляет 10 Гц. Размер программного кода исследуемого алгоритма составил 38 Кб. Язык программирования C++.

3. Результаты испытаний и их обсуждение

Главной целью первого этапа стендовых испытаний двигателя-демонстратора технологий ДДТ-35 являлось подтверждение заявленных данных и параметров двигателя, исследование работы основных узлов и систем двигателя, оценка уровня готовности примененных критических технологий. В целях безопасности испытаний не допускались резкие изменения режима двигателя.

Таким образом, в динамике работа адаптивного наблюдателя не оценивалась, а эффективность его работы проверялась только в статике по дисперсии (разбросу) оценок, разнице измеренных двигательных параметров, сформированных РЭД-35, и расчетных оценок адаптивного наблюдателя.

На начальном этапе испытаний ДДТ-35 были зафиксированы колебания физических параметров n_B , n_K с амплитудой до 1,8 % по параметру n_B и до 1 % по параметру n_K , обусловленные возмущающими воздействиями ветра в сопло.

На рисунках 5, 6 показаны процессы изменения параметров n_B , n_K и соответствующие оценки фильтром Язвинского при внешнем возмущении в условиях плавного увеличения режима работы ДДТ за время $\tau \approx 25$ сек.

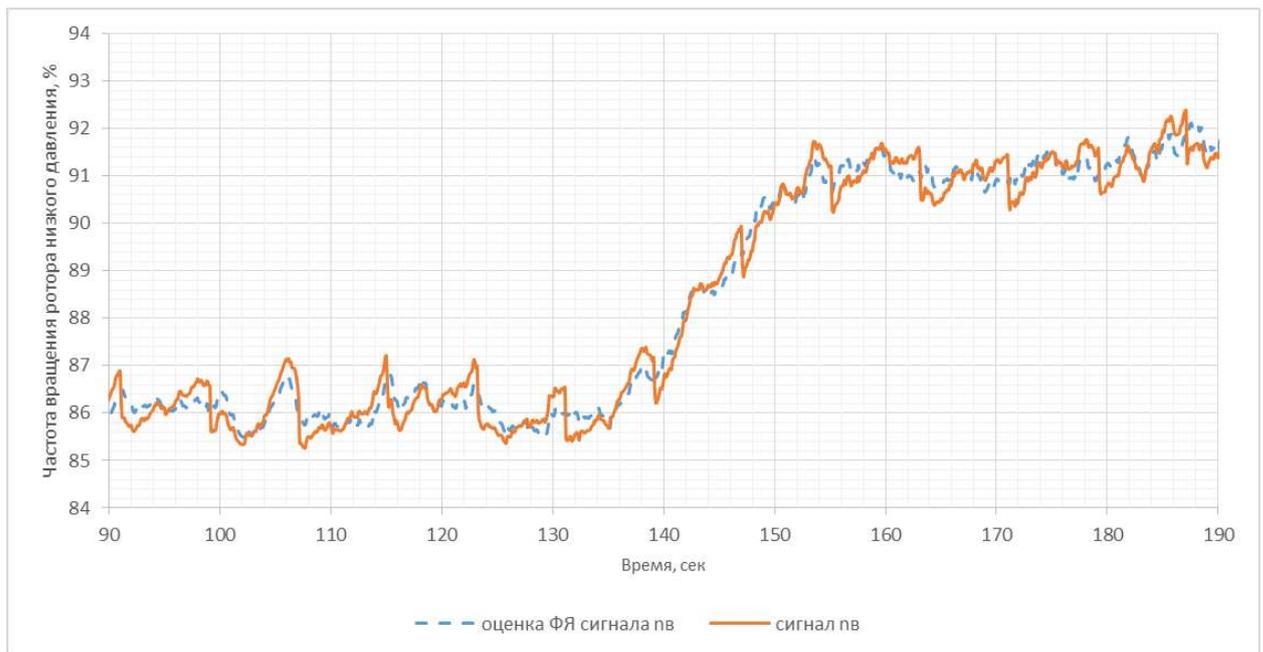


Рисунок 5 – График плавного увеличения частоты вращения ротора низкого давления (оранжевый) и оценки адаптивного фильтра Язвинского (синий)

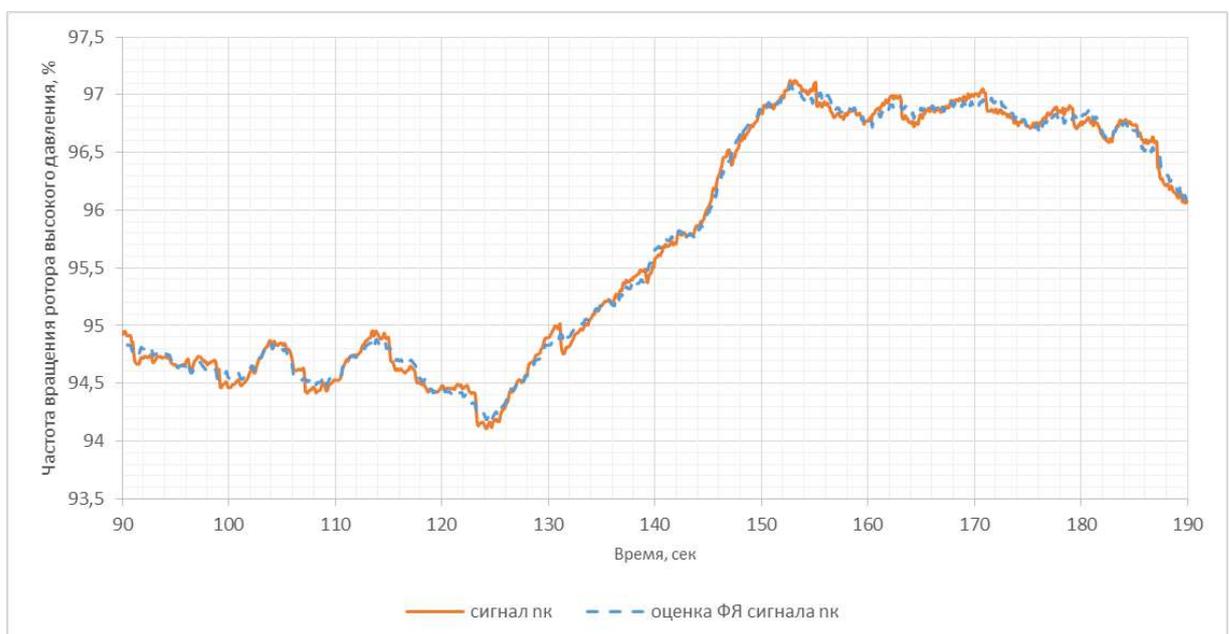


Рисунок 6 – График плавного увеличения частоты вращения компрессора высокого давления (оранжевый) и оценки адаптивного фильтра Язвинского (синий)

Из представленных графиков видно, что расчетные оценки частот вращений n_B , n_K на рассмотренных квазистационарных режимах носят в целом устойчивый характер. Разница между расчетными и измеренными параметрами n_B , n_K незначительна и не превышает погрешности измерения частоты вращения роторов современными датчиками магнитоиндукционного типа ($< 0,1 \%$), примененными в ДДТ.

На рисунках 7, 8 показаны процессы измерения сигналов n_B , n_K и соответствующие оценки фильтра Язвинского на установившемся режиме работы ДДТ пятого поколения большой тяги 35 тс без внешних возмущающих воздействий.

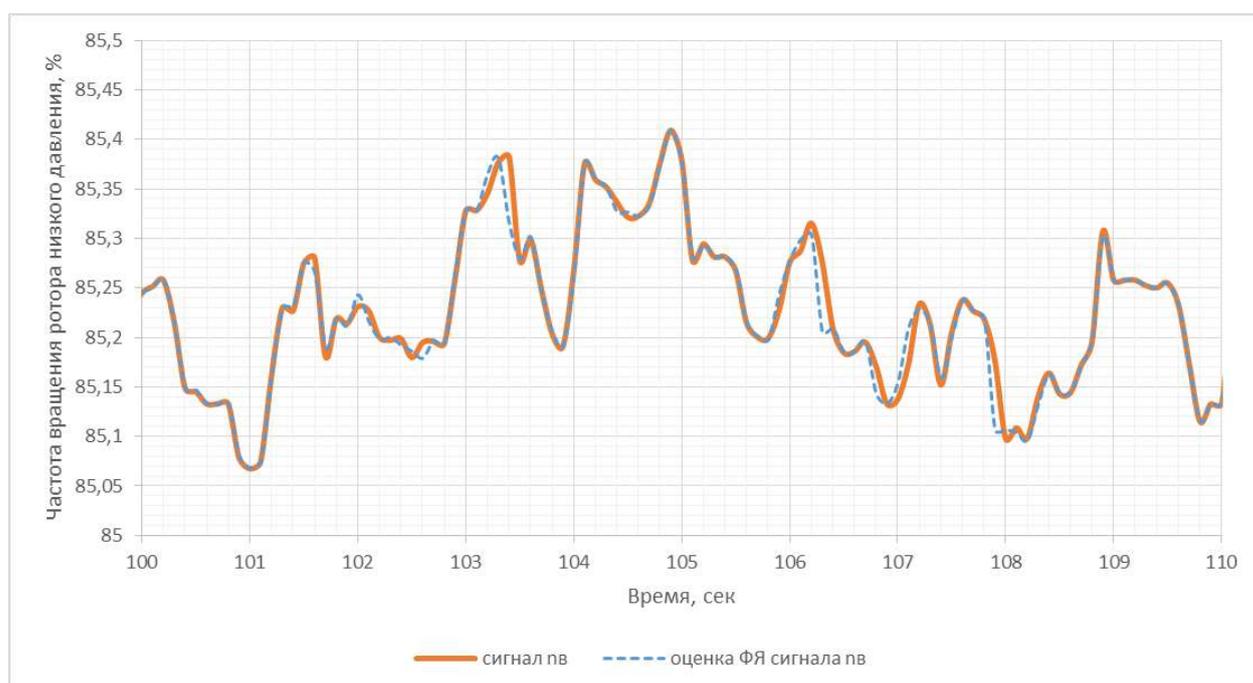


Рисунок 7 – График частоты вращения ротора низкого давления (синий) и оценки адаптивного фильтра Язвинского (оранжевый) на режиме 30 тс

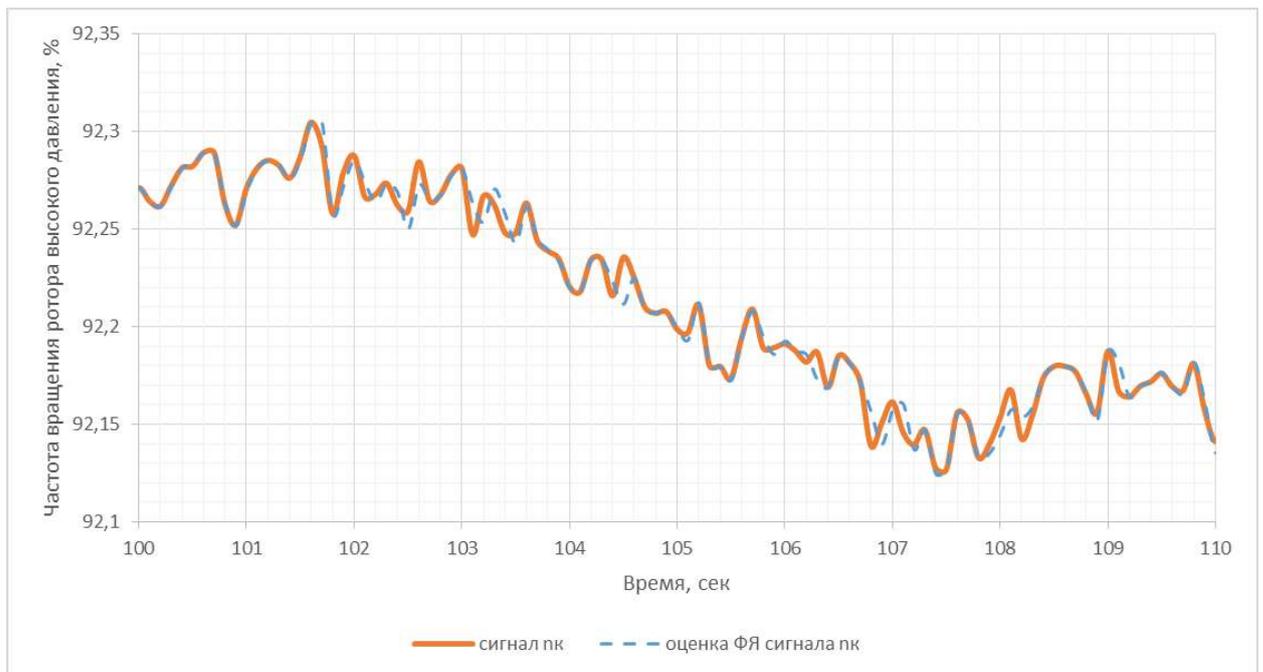


Рисунок 8 – График частоты вращения компрессора высокого давления (оранжевый) и оценки адаптивного фильтра Язвинского (синий) на режиме 30 тс

Из представленных данных видно, что при отсутствии возмущающих воздействий измеренные параметры n_B , n_K и их расчетные оценки на статических режимах практически совпадают, значимых запаздываний оценок не выявлено.

В таблице 1 представлены статистические оценки измеренных сигналов n_B , n_K и соответствующие расчетные оценки фильтром Язвинского на установившемся режиме работы двигателя с тягой $R=30$ тс без внешних возмущений на двигатель.

Таблица 1

Обозначение сигнала	Дисперсия сигнала, $Dx = \frac{\sum_n^i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$	Смещение, % $\Delta x = \bar{x}_{\text{сигнала}} - \bar{x}_{\text{оценки}}$
Частота вращения ротора низкого давления n_B , %	0,109	0,008
Оценка адаптивного фильтра Язвинского сигнала n_B , %	0,108	
Частота вращения ротора высокого давления n_K , %	0,058	0,001
Оценка адаптивного фильтра Язвинского сигнала n_K , %	0,057	

Статистические оценки разброса параметров (дисперсия, смещение) также показывают удовлетворительную сходимость расчётных и измеренных значений n_B , n_K [15, 26].

Однако утверждать о практическом отсутствии вычислительной ошибки фильтром Язвинского преждевременно. Подтверждение эффективности работы алгоритма, в т.ч. правильности выбранного значения ширины движущегося окна, следует дать только после выполнения динамических режимов (приёмистости, сбросы, встречные приёмистости, уход на второй круг, прерванный взлет и т.д.) с различным темпом перемещения рычага управления двигателем.

Таким образом, адаптивный наблюдатель в статике формирует несмещенную оценку с минимальной дисперсией. По результатам проведенного анализа установлено, что оценки, полученные в результате моделирования, свидетельствуют о качестве приведенных алгоритмов аналитического резервирования на основе адаптивного фильтра Язвинского.

Направление дальнейших исследований предусматривает:

- продолжение испытаний адаптивного наблюдателя на динамических режимах двигателя-демонстратора технологий пятого поколения большой тяги 35 тс;
- детальную оценку границ применимости разработанного алгоритма адаптивного наблюдателя по режимам работы ТРДД в полном объеме расчетных параметров n_B , n_K , P_K , T_T ;
- рассмотрение практического применения адаптивного наблюдателя на базе фильтра Язвинского в алгоритмах выявления отказов измерительных каналов САУ и К ТРДД;
- проведение экспериментальной проверки алгоритма на безмоторном стенде САУ ТРДД при имитации физических отказов датчиков n_B , n_K , P_K , T_T на входе в расчетный алгоритм в динамике.

Заключение

Впервые в авиадвигателестроении РФ выполнена экспериментальная проверка алгоритмического метода резервирования параметров САУ ТРДД на основе фильтра Язвинского в реальном масштабе времени при натурных испытаниях двигателя-демонстратора-технологий пятого поколения большой тяги 35 тс.

Частота опроса измеряемых входных параметров и частота выдачи расчетных оценок n_B , n_K , P_K , T_T на базе фильтра Язвинского составили 10 Гц. Размер программного кода апробированного адаптивного наблюдателя составил 38 Кб.

Проверка алгоритмического метода резервирования на основе фильтра Язвинского подтвердила возможность работы в составе электронных агрегатов САУ

и К ТРДД с приемлемыми показателями точности в статике. Максимальное смещение не превышает $|0.008|$ % на исследованных установившихся режимах работы.

Необходима дальнейшая проверка алгоритмического метода на динамических режимах работы ТРДД (приёмистости, сбросы, встречные приёмистости, уход на второй круг) и при физических отказах датчиков двигательных параметров n_B , n_K , P_K , T_T .

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список источников

1. Августинovich 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.
2. Августинovich В.Г., Кузнецова Т.А., Куракин А.Д., Фатыков А.И., Якушев А.П. Линейная адаптивная бортовая математическая модель двигателя для повышения надежности систем автоматического управления авиационным ГТД // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2015. № 42. С. 47–60.
3. Адаптивные фильтры/Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 440 с.

4. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Математическая модель двигателя в САУ ГТД для повышения надежности и качества управления // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=33278>
5. Кривошеев И.А., Годованюк А.Г. Использование моделей ГТД в составе адаптивных отказоустойчивых систем управления и контроля // Вестник УГАТУ. 2010. № 5 (40). С. 10-14.
6. Кузнецова Т.А., Августинович В.Г., Губарев Е.А. Алгоритмы диагностики и парирования отказов каналов измерения системы автоматического управления авиационным двигателем // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 16. С. 5–14.
7. Эзрохи Ю.А., Каленский С.М. Идентификация математической модели ГТД по результатам испытаний // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
8. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Зуев С. А., Бусурин В.И. Управление органами механизации компрессора газотурбинного двигателя с использованием его математической модели // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80286>
9. Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Плешивых А.С., Саженов А.Н., Грибков И.Н. Аналитическое резервирование в системе автоматического управления авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя на основе оптимальных наблюдателей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 57. С. 65-78. DOI: [10.18522/2311-3103-2022-2-65-78](https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-65-78)

10. Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Плешивых А.С., Саженов А.Н., Грибков И.Н. Алгоритмический метод повышения отказоустойчивости системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя // *Авиационная техника. Известия вузов.* 2022. № 2. С. 179-183.
11. Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Плешивых А.С., Саженов А.Н., Лисовин И.Г., Грибков И.Н. Синтез оптимального наблюдателя при отказах в канале измерения систем автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2019. № 57. С. 162-171.
DOI: [10.15593/2224-9982/2020.63.08](https://doi.org/10.15593/2224-9982/2020.63.08)
12. Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Плешивых А.С., Саженов А.Н., Грибков И.Н. Синтез оптимального наблюдателя при отсутствии априорной информации о характеристиках шума возмущения системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2020. № 57. С. 70-80.
13. Иноземцев А.А. Развитие технологий в отечественном гражданском авиадвигателестроении // *Труды Академии наук авиации и воздухоплавания.* 2024. № 1. С. 4-17.
14. Макаров А.В., Иноземцев А.А., Дегтярь В.Г., Харанжевский Е.В., Котельников А.Б., Вопнерук А.А. Обеспечение технологического суверенитета

России в металлургии и машиностроении // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94, № 3. С. 232–245.

15. Первадчук В.П., Давыдов А.Р. Прикладной статистический анализ результатов механических испытаний. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. - 131 с.

16. Jazwinski A.H. Stochastic Processes and Filtering Theory. New York: Academic press, 1970. 376 p.

17. Грошев А.В. Стратегия алгоритмического повышения точностных характеристик и информационной надежности инерциально-спутниковых навигационных систем в составе беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102217>

18. Иноземцев А.А., Савенков Ю.С., Саженов А.Н. Способ диагностики и парирования отказов датчиков регулируемых параметров двухканальной электронной системы автоматического управления газотурбинного двигателя. Патент RU 2817573С1. МПК F02С 9/00, 16.04.2014.

19. Иноземцев А.А. Двигатель ПД-14 – будущее российского авиапрома // Журнал «Инновации». 2013. № 12. С. 77-80.

20. Gibson J.S., Tesch J., Jumper E., Gordeyev S. Identification, prediction and control of aero optical wavefronts in laser beam propagation // 42nd AIAA Plasmadynamics and Laser Conf. (Honolulu, Hawaii, USA, June 27-30, 2011): Proc. Wash.: AIAA, 2011. 11 p. DOI: [10.2514/6.2011-3276](https://doi.org/10.2514/6.2011-3276)

21. Arun C. Interference Cancellation in Aircraft Cockpit by Adaptive Filters // MATEC Web of Conferences. 2016. No. 45. P. 05004. DOI: [10.2514/6.2011-3276](https://doi.org/10.2514/6.2011-3276)

22. Haykin S. Adaptive Filter Theory, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 4th Edition. 2001. 92 p.
23. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. - М.: Техносфера, 2013. 527 с.
24. Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Разработка адаптивного нейро-нечеткого регулятора частоты вращения вентилятора ТРДД // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 2. С. 47–50.
25. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями: Энциклопедический справочник / ред. О.С. Гуревич. – М.: Торус Пресс, 2011. – 208 с.
26. Прохоров А.В., Ушаков В.Г., Ушаков Н.Г. Задачи по теории вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Университет, 2009. – 327 с.

References

1. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A. To improve the reliability of gas turbine engine control systems using algorithmic methods. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2015. Vol. 326, No. 9. P. 68–77. (In Russ.)
2. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Kurakin A.D., Fatykov A.I., Yakushev A.P. Linear adaptive on-board mathematical model of the engine to improve the reliability of automatic control systems of aircraft gas turbine engines. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2015. No. 42. P. 47–60. (In Russ.)

3. Kouen K.F.N., Grant P.M. *Adaptivnye fil'try* (Adaptive filters). Moscow: Mir Publ., 1988. 440 p.
4. Gol'berg F.D., Gurevich O.S., Petukhov A.A. A mathematical model of the engine in aircraft for increasing of safety and quality control. *Trudy MAI*. 2012. No. 58. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33278>
5. Krivosheev I.A., Godovanyuk A.G. Use of gas turbine engine models in adaptive fault-tolerant control and monitoring systems. *Vestnik UGATU*. 2010. No. 5 (40). P. 10-14. (In Russ.)
6. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Gubarev E.A. Algorithms for diagnostics and parrying failures of measurement channels of the automatic control system of an aircraft engine. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2015. No. 16. P. 5–14. (In Russ.)
7. Ezrokhi Y.A., Kalenskii S.M. Identification of gte mathematical model by test data. *Trudy MAI*. 2022. No. 122. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
8. Gurevich O.S., Gol'berg F.D., Zuev S. A., Busurin V.I. Compressor mechanization control of gas-turbine engine using his simulation model. *Trudy MAI*. 2017. No. 93. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80286>
9. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Pleshivykh A.S., Sazhenkov A.N., Gribkov I.N. Analytical redundancy in the automatic control system of an aircraft turbojet twin-circuit engine based on optimal observers. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 57. P. 65-78. (In Russ.). DOI: [10.18522/2311-3103-2022-2-65-78](https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-65-78)

10. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Pleshivykh A.S., Sazhenkov A.N., Gribkov I.N. Algorithmic method for increasing the fault tolerance of the automatic control and monitoring system of a turbojet twin-circuit engine. *Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya vuzov*. 2022. No. 2. P. 179-183. (In Russ.)
11. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Pleshivykh A.S., Sazhenkov A.N., Lisovin I.G., Gribkov I.N. Synthesis of an optimal observer for failures in the measurement channel of automatic control and monitoring systems of a turbojet twin-circuit engine. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2019. No. 57. P. 162-171. (In Russ.). DOI: [10.15593/2224-9982/2020.63.08](https://doi.org/10.15593/2224-9982/2020.63.08)
12. Inozemtsev A.A., Lamanova N.G., Pleshivykh A.S., Sazhenkov A.N., Gribkov I.N. Synthesis of an optimal observer in the absence of a priori information on the characteristics of the disturbance noise of the automatic control and monitoring system of a turbojet twin-circuit engine. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2020. No. 57. P. 70-80. (In Russ.)
13. Inozemtsev A.A. Development of technologies in domestic civil aircraft engine manufacturing. *Trudy Akademii nauk aviatsii i vozdukhoplavaniya*. 2024. No. 1. P. 4-17. (In Russ.)
14. Makarov A.V., Inozemtsev A.A., Degtyar' V.G., Kharanzhevskii E.V., Kotel'nikov A.B., Vopneruk A.A. Ensuring Russia's technological sovereignty in metallurgy and mechanical engineering. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2024. Vol. 94, No. 3. P. 232–245. (In Russ.)

15. Pervadchuk V.P., Davydov A.R. *Prikladnoi statisticheskii analiz rezul'tatov mekhanicheskikh ispytanii* (Applied statistical analysis of mechanical test results: a tutorial). Perm': Izd-vo PNIPU Publ., 2018. 131 p.
16. Jazwinski A.H. *Stochastic Processes and Filtering Theory*. New York: Academic press, 1970. 376 p.
17. Groshev A.V. Algorithmic improvement strategy for accuracy characteristics and information reliability of inertial satellite navigation systems withing unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2019. No. 104. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102217>
18. Inozemtsev A.A., Savenkov Yu.S., Sazhenkov A.N. *Sposob diagnostiki i parirovaniya otkazov datchikov reguliruemyykh parametrov dvukhkanal'noi elektronnoi sistemy avtomaticheskogo upravleniya gazoturbinnogo dvigatelya. Patent RU 2817573C1. MPK F02C 9/00* (Method for diagnosing and countering failures of sensors of adjustable parameters of a two-channel electronic automatic control system of a gas turbine engine Patent RU 2817573C1. MPK F02C 9/00), 16.04.2014.
19. Inozemtsev A.A. PD-14 engine – the future of the Russian aviation industry. *Zhurnal «Innovatsii»*. 2013. No. 12. P. 77-80. (In Russ.)
20. Gibson J.S., Tesch J., Jumper E., Gordeyev S. Identification, prediction and control of aero optical wavefronts in laser beam propagation. *42nd AIAA Plasmadynamics and Laser Conf.* (Honolulu, Hawaii, USA, June 27-30, 2011): Proc. Wash.: AIAA, 2011. 11 p. DOI: [10.2514/6.2011-3276](https://doi.org/10.2514/6.2011-3276)

21. Arun C. Interference Cancellation in Aircraft Cockpit by Adaptive Filters. *MATEC Web of Conferences*. 2016. No. 45. P. 05004. DOI: [10.2514/6.2011-3276](https://doi.org/10.2514/6.2011-3276)
22. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 4 th Edition. 2001. 92 p.
23. Dzhigan V.I. *Adaptivnaya fil'tratsiya signalov: teoriya i algoritmy* (Adaptive signal filtering: theory and algorithms). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2013. 527 p.
24. Titov Yu.K., Filippenkov R.G., Khizhnyakov Yu.N., Yuzhakov A.A. Development of an adaptive neuro-fuzzy controller for turbofan engine fan speed. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2013. No. 2. P. 47–50. (In Russ.)
25. Gurevich O.S. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatelyami: Entsiklopedicheskii spravochnik* (Automatic control systems for aircraft gas turbine engines: Encyclopedic reference book). Moscow: Torus Press Publ., 2011. 208 p.
26. Prokhorov A.V., Ushakov V.G., Ushakov N.G. *Zadachi po teorii veroyatnostei. Osnovnye ponyatiya. Predel'nye teoremy. Sluchainye protsessy* (Problems in Probability Theory. Basic Concepts. Limit Theorems. Random Processes). Moscow: Universitet Publ., 2009. 327 p.

Статья поступила в редакцию 02.04.2025

Одобрена после рецензирования 10.04.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 02.04.2025; approved after reviewing on 10.04.2025; accepted for publication on 25.08.2025