

## ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ САУ ГТД НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА ЯЗВИНСКОГО

Плешивых А.С.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГАО ВО «ПНИПУ», г. Пермь, arthur.p.s.1995@mail.ru

*Ключевые слова:* авиационный двигатель, резервирование, математическая модель, отказоустойчивость, оптимальный наблюдатель, фильтр Калмана, фильтр Язвинского, переходный режим, метод наименьших квадратов.

К современным цифровым системам автоматического управления газотурбинных двигателей (САУ ГТД) предъявляются высокие требования по устойчивости к различного рода нарушениям и отказам. Достижение требуемого уровня отказоустойчивости сложных динамических систем достигается при помощи информационной избыточности, которая создается при помощи аппаратного или аналитического резервирования.

При аппаратном резервировании информационная избыточность создается на основе дублирования систем управления и измерения, когда показания неисправных или отказавших датчиков заменяются дублирующим каналом [1, 2].

При аналитическом резервировании информационная избыточность формируется при помощи алгоритмических методов. При этих методах неисправные или отказавшие датчики 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 достоверность процесса идентификации неисправности канала измерения и, следовательно, предотвратить отключение электронной системы управления [1, 2].

В мире предлагается ряд научно-технических решений аналитического резервирования в САУ ГТД, например, применение встроенных математических моделей в САУ ГТД, моделей «виртуальных» датчиков, цифровых фильтров, а также рассматриваются перспективы применения теории нечеткой логики и нейронных сетей для создания математических моделей сложных технических объектов двигателестроения.

Очевидно, что непрерывный промышленный прогресс в микроэлектронике способствует увеличению вычислительной мощности современных цифровых устройств и облегчает дальнейшее развитие перспективных алгоритмических методов резервирования САУ ГТД, требующих значительных вычислительных затрат.

Ставится задача исследования возможностей аналитического резервирования цифровых каналов измерения САУ ГТД. Так, предлагается метод аналитического резервирования, в котором в качестве дублирующих измерителей параметров ГТД используется оптимальный наблюдатель. Таким наблюдателем является адаптивный фильтр Язвинского, который позволяет вычислять оптимальные оценки вектора состояния и вектора выхода САУ ГТД в реальном времени на основе математической модели САУ ГТД, согласованной с фильтром, измерений параметров состояния, а также вероятностных характеристик сигналов датчиков и возмущающих воздействий [3]. Фильтр Язвинского основан на алгоритме оптимального фильтра Калмана, и отличается от него тем, что позволяет вычислять ковариационную матрицу шума возмущения в реальном времени. Это защищает фильтр от потери устойчивости расчета и, следовательно, обеспечивает стабильность оценок вектора выхода САУ ГТД [4]. Фильтр должен быть согласован с математической моделью САУ ГТД, рекуррентная идентификация которой проводилась по матричному алгоритму МНК в движущемся окне. Требуемые точность идентификации и времени запаздывания обеспечиваются оптимизацией ширины движущегося окна [1].

Функционирование САУ ГТД в малой окрестности установившегося движения описывается линейной, дискретной, стохастической моделью [1]:

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

Алгоритмы идентификации, ФК и ФЯ, а также обоснование их использования в предлагаемом методе повышения отказоустойчивости САУ ТРДД приведены в авторских работах [1 – 6].

Моделирование алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД проводилось на основе данных летных испытаний двигателя ПС-90А.

На рис. 1 показаны процессы изменения параметров частоты вращения ротора вентилятора и частоты вращения ротора высокого давления и соответствующие оптимальные оценки при работе фильтра Язвинского на переходном (Малый газ – 0,3 Ном – 0,7 Ном – 0,3 Ном – 0,7 Ном) режиме работы двигателя.

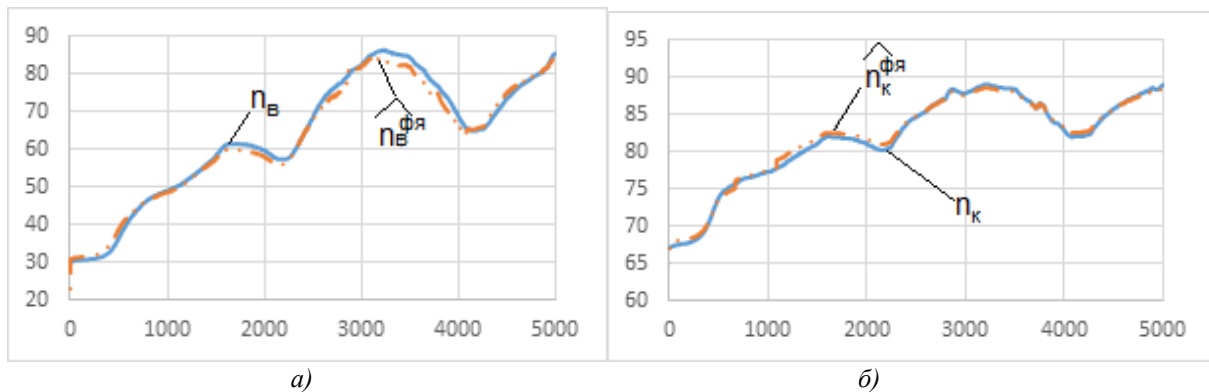


Рисунок 1 - Графики изменения параметров ТРДД на переходном режиме: а)  $n_v(k)$  – частота вращения ротора вентилятора,  $\widehat{n}_v^{\text{ФЯ}}(k)$  – оценка вектора выхода частоты вращения ротора вентилятора б)  $n_k(k)$  – частота вращения ротора высокого давления,  $\widehat{n}_k^{\text{ФЯ}}(k)$  – оценка вектора выхода частоты вращения ротора высокого давления

Анализ результатов моделирования на стационарном режиме работы ГТД показал, что фильтр Язвинского обеспечивает качественную оценку вектора выхода САУ ГТД, с минимальными смещением и ошибкой 2 %.

Направление дальнейших исследований предусматривает испытания предлагаемого алгоритма обеспечения отказоустойчивости САУ на стенде полунатурного моделирования АО «ОДК-Авиадвигатель» с использованием технологий модельно-ориентированного проектирования в различных конфигурациях работы фильтра и выбора алгоритма определения отказов датчиков. Предварительные исследования алгоритма адаптивного фильтра Язвинского на стенде для полунатурных испытаний САУ ГТД, без обрыва линий связи датчиков, показали его работоспособность, погрешность оценок вектора выхода САУ составила не более 3 %.

### Список литературы

1. Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Плешивых А.С., Грибков И.Н., Саженов А.Н. Аналитическое резервирование в системе автоматического управления авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя на основе оптимальных наблюдателей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 57. – С. 65-78.
2. Иноземцев А.А., Саженов А.Н., Плешивых А.С., Ламанова Н.Г., Грибков И.Н. Алгоритмический метод повышения отказоустойчивости системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя // Авиационная техника. Известия вузов. – 2022. – № 2. – С. 179-183.
3. Иноземцев А.А., Ламанова Н.Г., Саженов А.Н., Лисовин И.Г., Грибков И.Н., Плешивых А.С. Синтез оптимального наблюдателя при отказах в канале измерения систем автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя //

Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2019. – № 57. – С. 162-171.

4. Иноземцев, А.А., Саженов, А.Н., Плешивых, А.С., Ламанова, Н.Г., 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. – 2020. – № 57. – С. 70-80.

5. Н.Г. Ламанова, А.С. Плешивых, И.Н. Грибков, А.И. Фатыков. Идентификация математической модели системы автоматического управления газотурбинного двигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2019. – № 31. – С. 121-135.

#### **Сведения об авторах**

Плешивых А.С., аспирант ФГАОУ ВО «ПНИПУ», инженер отдела проектирования САУ АО «ОДК-Авиадвигатель».

### **INCREASING THE FAULT TOLERANCE OF THE MEASUREMENT CHANNEL OF ACS GTE BASED ON THE ADAPTIVE FILTER OF YAZVINSKY**

Pleshivykh A.S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, arthur.p.s.1995@mail.ru

*Keywords: aircraft engine, redundancy, mathematical model, fault tolerance, optimal observer, Kalman filter, Yazvinsky filter, transient mode, least squares method.*

The task is to study the possibilities of analytical redundancy of digital channels for measuring ACS GTE. A method of analytical redundancy is proposed, in which the optimal observer is used as backup gauges of gas turbine engine parameters - the Yazvinsky adaptive filter, which allows calculating the optimal estimates of the state vector and the output vector of the automatic control system of the gas turbine engine in real time based on the mathematical model of the automatic control system of the turbofan engine, consistent with the filter, measurements of the state parameters, as well as probabilistic characteristics of sensor signals and disturbing influences.

The analysis of the mathematical model of the ACS was carried out using the least squares method in a moving window. The accuracy of identification of the mathematical model and the required delay time are ensured by optimizing the width of the moving window.

The simulation of the algorithm for ensuring the fault tolerance of the automatic control system of the gas turbine engine was carried out on the basis of flight test data of the PS-90A engine. In operation, with the help of an adaptive filter, the following parameters are estimated: the rotor speed of the low-pressure compressor, the rotor speed of the high-pressure compressor.