

## ТРЕНДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК И ТРАНСМИССИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

*Соколов М.П., Земсков А.А., Куц М.С.*

*Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва*

**Ключевые слова:** вибродиагностика, трибодиагностика, удаленный диагностический центр, система контроля, система автоматического управления, неразрушающий контроль, большие данные, нейронные сети, машинное обучение.

**Аннотация.** В статье представлен обзор современных технологий контроля и диагностики двигателей и трансмиссии воздушных судов. Рассмотрены актуальные методы диагностики в направлениях трибодиагностики, термографии и вибродиагностики, а также представлены перспективные методы анализа полученных данных, базирующиеся на спектральном анализе и анализе временных рядов. Рассмотрены актуальные тренды в построении встраиваемых средств контроля и бортовых интегрированных систем. Показано, что текущее развитие двигается в сторону интеграции бортовых систем контроля и систем управления двигателем. подключаемые средства неразрушающего контроля; системы сбора и обработки больших данных. Представлена концептуальная схема удаленного центра диагностики как инструмента для построения локальных систем анализа. Сформированы предложения по использованию и дальнейшему развитию технологий в системах контроля современных и перспективных силовых установках и трансмиссиях воздушных судов.

## TRENDS IN MAINTENANCE DIAGNOSTICS OF AIRCRAFTS POWER EQUIPMENT AND TRANSMISSION

*Sokolov M.P., Zemskov A.A., Kuts M.S.*

*Central Institute of Aviation Motors, Moscow*

**Keywords:** vibrodiagnostics, tribodiagnosics, remote diagnostics center, monitoring system, control system, nondestructive testing, big data, neural networks, machine learning.

**Abstract.** The review of modern technology of monitoring and diagnostic of aircraft engine and transmission are presented in the paper. Current diagnostic methods in the areas of tribodiagnosics, thermography, and vibration diagnostics are considered, as well as promising methods for analyzing the data obtained based on spectral analysis and time series analysis. Current trends in the construction of built-in controls and on-board integrated systems are considered. It is shown that the current development is moving towards the integration of on-board control systems and engine management systems into large-scale data collection and processing systems. A conceptual scheme of a remote diagnostics center as a tool for building local analysis systems is presented. Proposals for the use and further development of technologies in the control systems of modern and advanced power plants and aircraft transmissions have been formed.

### Введение

Авиастроение в настоящее время не эффективно без специальных средств диагностики, защищающих воздушное судно от лётных происшествий разной степени тяжести и катастроф. Планируемый переход к эксплуатации по техническому состоянию современных самолетов предполагает такую степень совершенства расчетных методик оценки прочности и ресурса деталей двигателей и трансмиссий, при котором будет необязательным проведение их ресурсных испытаний. Однако несовершенство существующих расчетных методик подтверждается статистикой отказов, которая говорит о том, что большая часть поломок связана с действием не учитываемых в расчетах факторов. Такое положение дел определяет необходимость использования систем контроля и диагностики авиационных двигателей и трансмиссий, а появление прогрессивных форм технического обслуживания и ремонта инициирует развитие новых технологий контроля их технического состояния.

В данной статье приведен обзор современных методов и инструментов диагностики технического состояния; приведена структура современного диагностического центра, позволяющего осуществлять обработку большого массива данных условиях Индустрии 4.0.

### **Современные методы диагностики и контроля**

#### ***Диагностика по вибрационным параметрам***

Авиационные двигатели и трансмиссии генерируют вибрации, возникающие в результате их работы. Основными источниками вибраций являются рабочие колеса двигателя, валы, а также зубчатые передачи, шлицевые соединения и подшипники качения. Таким образом, большинство неисправностей, возникающих в силовых установках, оказывают влияние на вибрации и могут быть обнаружены в результате анализа вибросигнала. По этой причине существуют требования к контролю уровней вибраций авиационных двигателей [1].

В то же время, ввиду того, что существует чрезвычайно много факторов, оказывающих влияние на вибросигнал, чрезвычайно важным является задача идентификации и классификаций причин изменений в вибросигнале. Эти задачи, по своей сути, являются задачами машинного обучения. Конкретные методы обработки вибросигналов представлены в далее в статье.

#### ***Перспективные методы трибодиагностики***

Традиционно анализ продуктов износа использовался в качестве одного из средств диагностики работы двигателя и позволял диагностировать не только факт наличия неисправности по концентрации частиц в отработанном масле, но и локализовать неисправность [2]. Однако ввиду наличия на современных двигателях фильтров тонкой очистки, достижение высокой эффективности метода становится возможным лишь при комплексном подходе к анализу, который должен включать в себя:

- анализ частиц износа с контрольных слоев фильтрующих элементов, магнитных пробок, фильтров-сигнализаторов и стружкосигнализаторов;
- современные методы и аппаратура для анализа материала – атомноэлектронная спектromетрия, электронная микроскопия, рентгенофлюорисцентные анализаторы, сцинтиляционные детекторы;
- многоэлементный спектральный анализ.

#### ***Тепловизионные методы контроля***

Важным методом диагностики, приобретающим все большую популярность, является термография, занимающая лидирующую позицию по наглядности представления результатов при высокой точности измерений. На данный момент термография активно используется для контроля повреждений лопаток вентилятора [3, 4], контроля однородности теплозащитных покрытий [3, 5], контроля состояния охлаждаемых рабочих лопаток турбин; контроля утечек в уплотнениях и контроля теплового состояния подшипников опор [6].

Из отечественных систем, предназначенных для тепловизионного анализа, следует отметить программный комплекс TVision [7], разработанный в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Данный комплекс позволяет осуществлять обнаружение поверхностных и внутренних дефектов в деталях, идентифицировать размеры и форму дефектов, а также осуществлять распознавание структуру повреждения в реальном времени по цифровым изображениям, полученным с тепловизора.

### **Методы обработки динамических сигналов**

#### ***Анализ в частотной области***

Методы анализа в частотной области основаны на преобразовании Фурье и его эффективной вычислительной реализации – быстром преобразовании Фурье (БПФ), после которого формируется спектр сигнала. В полученном спектре присутствуют гармоники вынужденных колебаний, генерируемый различными деталями на своих характерных частотах, обусловленных, в первую очередь, их вращением с частотой, пропорциональной

частоте вращения двигателя. Таким образом, рассматривается модель вибраций как полигармоническая, т.е. равная сумме колебаний на этих частотах [8].

При регистрации сигналов вибраций параллельно регистрируется синхросигнал вращения одного из валов редуктора. Наличие этого сигнала позволяет определить частоты вынужденных колебаний и их комбинации в любой момент времени при работе редуктора. Это, в свою очередь, позволяет определить фактическую несущую частоту каждой гармонической составляющей, генерируемой той или иной деталью.

Таким образом, на основе сигналов частоты вращения и вибраций рассчитывается набор параметров, характеризующих амплитуды вибраций каждой детали (валы, зубчатые колеса и т.п.) согласно кинематической схеме трансмиссии. В дальнейшем данный набор параметров служит диагностическим признаком для оценки состояния соответствующих деталей и узлов в целом.

#### ***Анализ во временной области***

В реальных условиях эксплуатации невозможно обеспечить стационарный режим работы двигателя, что приводит к флуктуациям частоты его вращения. Это накладывает определенное ограничение на применимость анализа на основе БПФ, поскольку данный метод работает только со стационарными режимами: для его применения необходимо предварительно определять стационарный участок, на котором флуктуация частоты вращения не превышает допустимого порога. Это существенным образом уменьшает информативность измеренных сигналов, поскольку большая часть из них попросту отбраковывается в силу нестационарности. В этой связи особый интерес представляют методы анализа во временной области, получившие новый этап развития в связи с развитием вычислительной техники и математических методов.

Одним из таких методов является **разложение по эмпирическим модам** (empirical mode decomposition, EMD), в основе которого лежит преобразование Гильберта-Хуанга [9]. EMD нашел применение для анализа дефектов подшипников, зубчатых передач и диагностики ГТУ.

Первоначально метод EMD был разработан для анализа нелинейных нестационарных сигналов, получаемых в океанологии, геофизике и гидрогазодинамике [9]. Он позволяет разложить исходный сигнал на эмпирические ортогональные моды, образуемые внутренними модовыми функциями (intrinsic mode functions, IMF), обладающих следующими свойствами:

1. Количество экстремумов функции (максимумов и минимумов) и количество пересечений нуля не должны отличаться более чем на единицу.

2. В любой точке функции среднее значение огибающих, определенных локальными максимумами и локальными минимумами, должно быть нулевым.

После декомпозиции сигнала на эмпирические моды, к ним может быть применен Гильбертов спектральный анализ, в результате которого могут быть получены временные кривые, характеризующие амплитуды колебаний на каждой из полученных мод.

К недостаткам данного метода следует отнести чувствительность к шумам и эмпирический характер разложения, что затрудняет идентификацию мод.

Альтернативным методом является **анализ сингулярного спектра** (Singular Spectrum Analysis, SSA) или метод «Гусеница» [10] позволяющий получить физические моды сигнала, путем сингулярного разложения автокорреляционной матрицы сигнала, в результате чего, при правильном подборе параметров, возможно получить разложение сигнала на физические моды, при довольно ограниченной информации.

Теория данного метода основана на разложении Карунена-Лоэва и методе главных компонент. Впервые данный метод был предложен в работах [11, 12]. Данная методика состоит из 4 шагов:

- 1) вложение;
- 2) сингулярное разложение (SVD);
- 3) группировка;
- 4) диагональное усреднение.

В результате применения данного метода исходный сигнал разбивается на сингулярные моды, отсортированные в порядке убывания ковариации с исходным сигналом. Подробности данного метода хорошо изложены в работах Голяндиной [10, 13].

Данный метод обладает теми же достоинствами, что и разложение по эмпирическим модам, однако он обладает лучшими вычислительными характеристиками – хорошей устойчивостью, невысокой вычислительной сложностью и возможностью масштабирования для параллельных вычислений, поскольку он основан на сингулярном разложении. Недостатками его является наличие неавтоматизированных шагов (шаг группировки компонент) и, общий с методом разложения по эмпирическим модам недостаток – невозможность проверять гипотезы в силу отсутствия априорной модели.

Развитием метода гусеницы можно считать **разложение по динамическим модам** (dynamic mode decomposition, DMD), хотя и исторически они не связаны. Первоначально данный метод был предложен Шмидтом в работах [14, 15] для решения задач газогидродинамики для идентификации пространственно-временных структур в данных высокой размерности. DMD основано на собственном ортогональном разложении [16], основанном, в свою очередь, на сингулярном разложении. По этой причине данный метод очень хорошо масштабируется на системы высокой размерности и обладает хорошими вычислительными свойствами. Метод хорошо поддается распараллеливанию и потоковой обработке. Подробности данного метода можно найти в работах [16, 17].

На текущий момент данный метод нашел широкое применение в задачах гидрогазодинамики, эпидемиологии, нейронаук и обработке видео. В контексте машиностроения существуют работы по применению данного метода к мониторингу состояния элементов трансмиссий, анализу работы турбин и в робототехнике.

Основным достоинством данного метода является то, что он не только позволяет проанализировать полученный сигнал, но и построить экстраполяционную модель, позволяющую осуществлять прогнозирование.

Серьезным недостатком метода DMD является чувствительность к шуму. В этой связи интерес представляет **метод стохастической идентификации подпространств** (stochastic subspace identification, SSI) [18], широко используемый в теории управления для идентификации параметров динамических систем. Данный метод нашел широкое применение в операционном модальном анализе [19], где с его помощью определяют собственные частоты и модальное демпфирование системы. Подробности реализации метода SSI представлены в работах [18, 20].

### ***Методы анализа на основе нейронных сетей***

Для выявления закономерностей в накопленных данных и более эффективного использования диагностической информации применяется ряд перспективных методов, относящихся к категории алгоритмов на основе искусственных нейронных сетей (ИНС).

Нейросетевые модели представляют собой универсальное средство для решения задач разведочного анализа данных в экспертных системах. В системах диагностики и контроля воздушных судов ИНС применяются для решения следующих задач:

- установление количества характерных состояний парка двигателя по особенностям группировки данных в многомерном пространстве контролируемых параметров (*кластеризация*) [21];
- отнесение текущего состояния двигателя к одному из зарегистрированных ранее состояний, характерных для парка однотипных двигателей (*классификация*);
- выявление скрытых связей между контролируемыми параметрами, которые обусловлены отказами и неисправностями (*идентификация внутренней динамики*);
- формирование решений о появлении новых состояний двигателя и трансмиссий после проверки вхождения значений контролируемых параметров в имеющиеся модели классификации;
- представление правил классификации характерных состояний двигателя в виде компактных и удобных для интерпретации двумерных карт (*визуализация данных*).

Наряду с возможностью решения широкого круга задач параметрической диагностики, нейросетевые модели обладают также преимуществами, определяющими удобство их использования в программной системе экспертной поддержки принимаемых решений. Такими преимуществами являются:

- универсальность подходов и методов программной реализации алгоритмов, позволяющая оперативно создавать, настраивать и трансформировать нейросетевые модели под решаемые задачи;

- высокая повторяемость результатов в условиях работы с неполной или искаженной информацией, вызванной ошибками при измерении параметров, сбоями записывающей аппаратуры и пр.;

- решение задач идентификации состояний без необходимости представления формализованного описания диагностических алгоритмов.

Следует отметить, что существует очень тесная связь ИНС и методов машинного обучения и анализа данных по типу разложения по динамическим модам: объединение этих двух подходов позволяет распространить аппарат идентификации внутренней динамики на нелинейные системы за счет представлений Купмана, реализуемых при помощи нейронных сетей. Подробнее об этом можно найти в [16].

### **Встраиваемые измерительные средства**

#### ***Датчики оборотов***

Для диагностики технического состояния зубчатых колес приводных систем двигателя и трансмиссии могут использоваться регистрация и последующий анализ сигналов кинематической погрешности (КП) зубчатых передач. Метод анализа КП является, практически, методом прямых измерений, который применяется в основном для контроля кинематической погрешности зубчатых колес и передач в однопрофильном зацеплении. Ранее данный метод обычно применялся на измерительных режимах при низких частотах вращения, без рабочих нагрузок. Для осуществления такого рода анализа необходимо наличие на валах исследуемых передач высокоточных датчиков оборотов, по типу энкодеров. Однако, использование энкодеров в трансмиссиях воздушных судов крайне затруднено ввиду жестких условий эксплуатации – высокой температуры и вибрации. В связи с этим возникает необходимость разработки датчиков, встраиваемых в приводные системы двигателей и агрегаты трансмиссии. На рисунке 1 представлены опытные образцы магнитоэлектрических датчиков угла поворота двух типоразмеров, разработанные в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» для перспективных двигателей. Количество импульсов на один оборот составляет 1080 и 2040 соответственно, что достаточно для получения сигнала кинематической погрешности необходимой для последующего анализа детализации.



Рис. 1. Встраиваемые магнитоэлектрические датчики угла поворота

#### ***Вибропреобразователи***

Ввиду непрерывно увеличивающегося энергопотребления и, как следствие, потребности во все большей эффективности энергомашин, современные турбоагрегаты вынуждены работать во все более тяжелых режимах. Разрабатываемые в настоящее время авиационные

двигатели предъявляют к средствам их контроля повышенные требования, такие как увеличенный масса, частотный диапазон измерений вибраций, а также стойкость ко внешним воздействующим факторам. Это делает невозможным использование традиционных вибропреобразователей на основе широко применяемых пьезоэлектрических чувствительных элементов, например, кварца и ЦТС-26. Для выполнения данных требований необходимо использовать более дорогостоящие материалы. Так датчики с частотным диапазоном до 20 кГц на основе чувствительного элемента из ниобата лития были разработаны АО «Виброприбор». Проведенные испытания показали надежность такого рода датчиков для использования при температурах до 250 градусов, и вибрациях до 300g.

### Бортовые системы контроля

Важным трендом развития бортовых систем контроля и диагностики (БСКД) является их интеграция с системами автоматического управления воздушным судном. Такая интеграция, в перспективе, позволит:

- осуществлять корректировку законов управления в зависимости от текущего состояния отдельных агрегатов и воздушного судна в целом;
- проводить диагностику по параметрам, вычисление которых невозможно или не целесообразно, по их расчетным значениям, полученным при помощи программного обеспечения САУ.

К числу теоретических наработок, подтвержденных расчетными и экспериментальными работами, в настоящее время относятся:

- а) алгоритмы расширенного вибрационного контроля и диагностики состояния двигателя с контуром подстройки алгоритмов управления (см. рис. 2) [22, 23];
- б) алгоритмы контроля длительной и циклической повреждаемости основных деталей двигателя [24];
- в) поузловая диагностика двигателя, основанная на обратном пересчете наблюдаемых отклонений параметров термогазодинамических моделей [25].

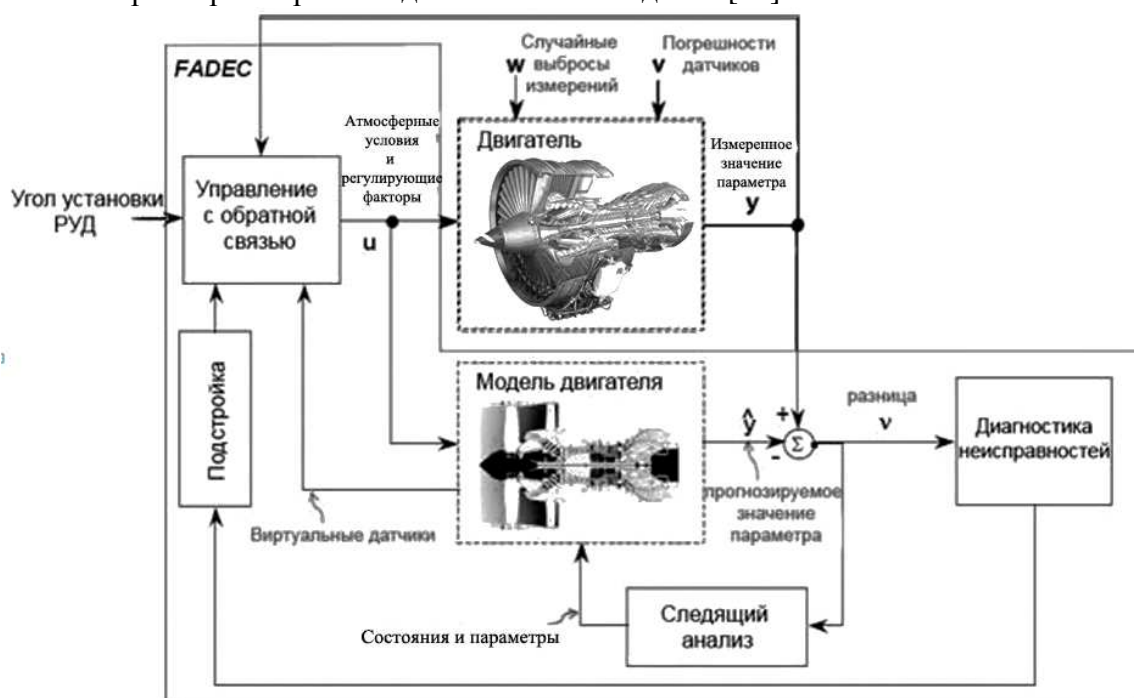


Рис. 2. Схема САУ с контуром подстройки алгоритмов управления в зависимости от состояния двигателя приведена

### Системы наземной обработки

Как показывают современные тенденции, большинство ставших традиционными функций наземных систем (например, расчет наработки, диагностика неисправностей, краткосрочное прогнозирование технического состояния) переносится в программное

обеспечение бортовых устройств контроля двигателя. Вместе с тем наземные системы укрепляют свое значение как удаленные центры диагностики, обеспечивающие функции сбора и совместного анализа комплексных данных о техническом состоянии двигателя.

Зарубежная практика показывает, что наиболее востребованные направления развития наземных систем связаны с возможностями, которые увеличивают экономический эффект от использования двигателей. К таким возможностям относятся:

- управление техническим состоянием двигателя (формирование оптимальных режимов работы) по информации об условиях возникновения и развития характерных (повторяющихся) неисправностей;

- формирование оптимальных параметров для управления воздушным судном по результатам мониторинга эксплуатационных параметров (расход топлива, тяга, вибрация и пр.) парка эксплуатируемых двигателей;

- планирование и оптимизация сроков и объемов технического обслуживания и ремонта двигателя по информации о ресурсах узлов и деталей с учетом их технического состояния и фактической повреждаемости по данным системы контроля.

На основе анализа работ, проводимых компаниями General Electric и Rolls-Royce – признанными мировыми лидерами в области авиастроения, – а также на основе собственного опыта ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», как единственной в стране организации, осуществляющей полный цикл исследовательских работ по созданию, испытанию и научно-техническому сопровождению в эксплуатации двигателей и газотурбинных установок, была сформирована структурная схема современного варианта удаленного центра диагностики (УДЦ), приведенная на рисунке 3.

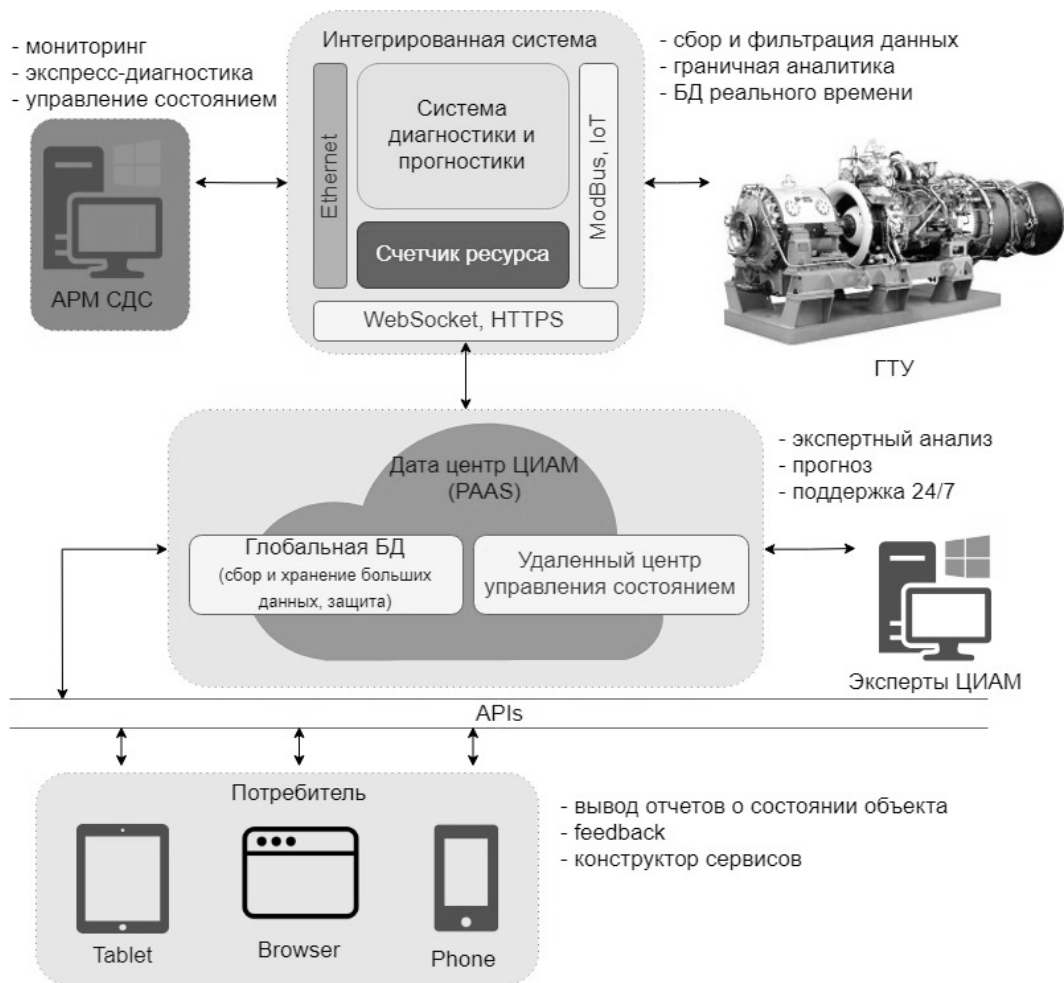


Рис. 3. Структурная схема удаленного центра диагностики

В целом в программной реализации УДЦ можно выделить три основных уровня:

- уровень сбора и передачи данных;
- уровень ядра платформы, обеспечивающий безопасность, интеграцию всех модулей, организацию хранения и обмена данными между различными компонентами, конфигурацию системы и др.;
- сервисный уровень, на котором осуществляется непосредственное предоставление полезных услуги потребителю (идентификация параметров модели, визуализация параметров и т.п.).

Важным компонентом системы, является наличие API, предоставляющим необходимый набор функций доступа к данным для их анализа и визуализации. Это позволяет строить конкретные реализации потребительских приложений поверх платформы.

Другим ключевым свойством программной платформы является абстрагирование от источника исходных данных. Выделение функций сбора данных в отдельное серверное приложение представляет системе следующие достоинства:

- изменения в серверной части не затронут основной информации УДЦ.
- уменьшится нагрузка на вычислительную систему, на которой работает УДЦ;
- появляется возможность использования готовых опробованных и надежных решений;
- при большом потоке данных сервер можно масштабировать отдельно от всей системы УДЦ.

### **Заключение**

В статье рассмотрены перспективные средства и методы контроля и прогнозирования технического состояния, представляющие основные направления совершенствования систем контроля авиационных двигателей и трансмиссий, в обеспечение их перевода на прогрессивные стратегии технического обслуживания и эксплуатации.

Развитие вычислительной техники и встраиваемых систем контроля позволяет получать все большее количество данных, на основе которых становится возможным идентификация сложной внутренней динамики. Это обуславливает возможность применения для анализа математических методов, сочетающих в себе нелинейную динамику, теорию управления и искусственные нейронные сети. Использование сложных алгоритмов диагностики, в свою очередь, побуждает переносить обработку и хранение данных в удаленные центры, предоставляющие доступ к ним по запросу. В то же время часть диагностической системы остается на борту, постепенно интегрируясь с системой управления, за счет чего становится возможным предупреждение неисправностей посредством эффективного управления режимами работы двигателя и трансмиссии.

### **Список литературы**

1. ГОСТ 26382-84. Двигатели газотурбинные гражданской авиации. Допустимые уровни вибрации и общие требования к контролю вибрации. – М: Изд. Стандартов, 1984. – 15с.
2. Степанов В.А. Диагностика технического состояния узлов трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле. – Рыбинск: НПО “Сатурн,” 2002. – 231 с.
3. Melnyk S., Petrichenko G., Tuluzov I. Metrology Aspects of Measuring are in the Tasks of Thermal Tomography // Metrology and instruments. 2017, no. 5, pp. 38-47.
4. Zenzinger G., Bamberg J., Satzger W., Carl V. Thermographic crack detection by eddy current excitation // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007, vol. 22, iss. 2-3, pp. 101-111. DOI: 10.1080/10589750701447920.
5. Стороженко В.А., Мешков С.Н., Маслова В.А. Методы распознавания дефектов при тепловом контроле элементов авиакосмической техники // Сборник трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная электроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ2005). – Харьков: ХНУРЭ, 2005. – Ч. 3. – С. 370-373.
6. Mehta A., Goyal D., Choudhary A., Pabla B.S., Belghith S. Machine Learning-Based Fault Diagnosis of Self-Aligning Bearings for Rotating Machinery Using Infrared Thermography // Mathematical Problems in Engineering. 2021, article ID 9947300, 15 p. DOI: 10.1155/2021/9947300.
7. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015616086 РФ. Программа обнаружения дефектов деталей авиационных двигателей по тепловизионным сигналам («TVISION») / Соколов М.П., Ткаченко Л.Ю. – Заявка № 2015612587 от 02.04.2015; зарег. 29.05.2015.



8. Голованов В.В., Василенко В.Г., Земсков А.А., Панов С.С., Емельянова А.А. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2015. – Т. 14, №3-1. – С. 213–221. – DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-213-221.
9. Norden H., Zheng S., Steven L., Wu M.L.C., Hsing S., Quanan Z., Nai-Chyuan Y., Chi-Chao T., Henry L. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998, vol. 454, no. 1971, pp. 903-995.
10. Голяндина Н.Э. Метод Гусеница-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 76 с.
11. Fraedrich K. Estimating the Dimensions of Weather and Climate Attractors // Journal of the Atmospheric Sciences. 1986, vol. 43, no. 5, pp. 419-432.
12. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D: Nonlinear Phenomena. North-Holland, 1986, vol. 20, no. 2-3, pp. 217-236.
13. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. Springer, 2013, 120p.
14. Schmid P.J., Sesterhenn J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data // Journal of Fluid Mechanics. 2008, vol. 656. DOI: 10.1017/S0022112010001217.
15. Schmid P., L. Li, Juniper M., Pust O. Applications of the dynamic mode decomposition // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2010, vol. 25(1), pp. 249-259. DOI: 10.1007/s00162-010-0203-9.
16. Brunton S.L., Kutz J.N. Data Driven Science & Engineering – Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. Cambridge University Press, 2019. 492 p.
17. Tu J.H., Rowley C.W., Luchtenburg D.M., Brunton S.L., Kutz J.N. On dynamic mode decomposition: Theory and applications // Journal of Computational Dynamics. 2014, vol. 1, no. 2, pp. 391-421. DOI: 10.3934/jcd.2014.1.391.
18. Overschee P. Subspace identification: Theory, implementation, application. Kluwer Academic Publishers, 1997. 254 p.
19. Brincker R., Ventura C. Introduction to operational modal analysis. John Wiley & Sons, 2015. 360 p.
20. Brincker R., Andersen P. Understanding stochastic subspace identification // Conference Proceedings: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics. 2006.
21. Егоров И.В., Соколов М.П. Сравнение эффективности нейросетевых алгоритмов с методами факторного анализа при диагностировании технического состояния ГТД // Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники». – 2007. – №123. – С. 89-95.
22. Иванов И.И., Мясников В.Ю., Блинник Б.С. Нелинейная редуцированная динамическая модель турбовентиляторного двигателя для анализа вибраций при обрыве лопатки вентилятора // Прочность и надежность газотурбинных двигателей. Сборник научных трудов. – М.: Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, 2020. – С. 114-120.
23. Патент № 2236671 РФ. Способ эксплуатации авиационного газотурбинного двигателя по его техническому состоянию / Кирюхин В.В., Колотников М.Е., Марчуков Е.Ю., Мельник В.И., Чепкин В.М. – №2003110447/06, заявл. 14.04.2003; опубл. 20.09.2004, Бюл. №26.
24. Патент № 135801 РФ. Устройство для контроля эквивалентной циклической повреждаемости авиационных двигателей / Егоров И.В., Соколов М.П. – Заявка №2013127868/06, заявл. 20.06.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. №35.
25. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Бортовая математическая модель двигателя в составе САУ ГТД для повышения отказоустойчивости и качества управления // Сборник трудов ЦИАМ им. П.И. Баранова «Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями». – М: Торус Пресс, 2010. – С. 81-89.

## References

1. State Standard 26382-84. Gas turbine engines for civil aviation. Permissible vibration levels and general requirements for vibration control. – М.: Publ. of Standards, 1984. – 15 p.
2. Stepanov V.A. Diagnostics of the technical condition of transmission units of gas turbine engines by parameters of wear products in oil. – Rybinsk: NPO «Saturn», 2002. – 231 p.
3. Melnyk S., Petrichenko G., Tuluzov I. Metrology Aspects of Measuring are in the Tasks of Thermal Tomography // Metrology and instruments. 2017, no. 5, pp. 38-47.
4. Zenzinger G., Bamberg J., Satzger W., Carl V. Thermographic crack detection by eddy current excitation // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007, vol. 22, iss. 2-3, pp. 101-111. DOI: 10.1080/10589750701447920.
5. Storozhenko V.A., Meshkov S.N., Maslova V.A. Methods for Recognizing Defects in Thermal Inspection of Aerospace Engineering Elements // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International radio-electronic forum «Applied electronics. State and development prospects» (MRF2005). – Kharkiv: Khar. Gov. university of Radio-Electronic, 2005. – Part 3. – P. 370-373.
6. Mehta A., Goyal D., Choudhary A., Pabla B.S., Belghith S. Machine Learning-Based Fault Diagnosis of Self-Aligning Bearings for Rotating Machinery Using Infrared Thermography // Mathematical Problems in Engineering. 2021, article ID 9947300, 15 p. DOI: 10.1155/2021/9947300.

7. Certificate of state registration of computer programs No. 2015616086 RU. The program for detecting defects in aircraft engine parts by thermal imaging signals («TVISION») / Sokolov M.P., Tkachenko L.Yu. – Application No. 2015612587 from 02.04.2015; reg. 29.05.2015.
8. Golovanov V.V., Vasilenko V.G., Zemskov A.A., Panov S.S., Emelyanova A.A. Diagnostic methods and tools for condition-based maintenance of aircraft drives // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2015, vol. 14, no. 3-1, pp. 213-221. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-213-221.
9. Norden H., Zheng S., Steven L., Wu M.L.C., Hsing S., Quanan Z., Nai-Chyuan Y., Chi-Chao T., Henry L. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1998, vol. 454, no. 1971, pp. 903-995.
10. Golyandina N.E. Caterpillar-SSA Method: Time Series Analysis. – SPb: SPbSU, 2004. – 76 p.
11. Fraedrich K. Estimating the Dimensions of Weather and Climate Attractors // Journal of the Atmospheric Sciences. 1986, vol. 43, no. 5, pp. 419-432.
12. Broomhead D.S., King G.P. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D: Nonlinear Phenomena. North-Holland, 1986, vol. 20, no. 2-3, pp. 217-236.
13. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. Springer, 2013, 120p.
14. Schmid P.J., Sesterhenn J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data // Journal of Fluid Mechanics. 2008, vol. 656. DOI: 10.1017/S0022112010001217.
15. Schmid P., L. Li, Juniper M., Pust O. Applications of the dynamic mode decomposition // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2010, vol. 25(1), pp. 249-259. DOI: 10.1007/s00162-010-0203-9.
16. Brunton S.L., Kutz J.N. Data Driven Science & Engineering – Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. Cambridge University Press, 2019. 492 p.
17. Tu J.H., Rowley C.W., Luchtenburg D.M., Brunton S.L., Kutz J.N. On dynamic mode decomposition: Theory and applications // Journal of Computational Dynamics. 2014, vol. 1, no. 2, pp. 391-421. DOI: 10.3934/jcd.2014.1.391.
18. Overschee P. Subspace identification: Theory, implementation, application. Kluwer Academic Publishers, 1997. 254 p.
19. Brincker R., Ventura C. Introduction to operational modal analysis. John Wiley & Sons, 2015. 360 p.
20. Brincker R., Andersen P. Understanding stochastic subspace identification // Conference Proceedings: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics. 2006.
21. Egorov I.V., Sokolov M.P. Comparison of the effectiveness of neural network algorithms with factor analysis methods in diagnosing the technical condition of a gas turbine engine // Scientific Bulletin of The MSTUCA. Civil Aviation High Technologies. 2007, no. 123, pp. 89-95.
22. Ivanov I.I., Myasnikov V.Yu., Blinnik B.S. Nonlinear Reduced Dynamic Model of a Turbofan Engine for Analyzing Vibrations in the Case of a Fan Blade Break // Proceedings “Durability and reliability of gas turbine engines”. – M.: Central Institute of Aviation Motors, 2020. – P. 114-120.
23. Patent No. 2236671 RU. The method of operation of an aircraft gas turbine engine according to its technical condition / Kiryukhin V.V., Kolotnikov M.E., Marchukov E.Yu., Melnik V.I., Chepkin V.M. – Application No. 2003110447/06 from 14.04.2003; publ. 20.09.2004, Bul. No. 26.
24. Patent No. 135801 RU. Device for monitoring the equivalent cyclic damage of aircraft engines: utility model patent / Egorov I.V., Sokolov M.P. – Application No. 2013127868/06 from 20.06.2013; publ. 20.12.2013, Bul. No. 35.
25. Gol'berg F.D., Gurevich O.S., Petuhov A.A. On-board mathematical model of the engine as part of the GTE ACS to improve fault tolerance and control quality // Proceedings of Central Institute of Aviation Motors «Automatic control systems for aircraft gas turbine engines». – M: Torus Press, 2010. – P. 81-89.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Соколов Максим Павлович</b> – начальник сектора бортовых и наземных систем контроля авиационных двигателей	<b>Sokolov Maxim Pavlovich</b> – head of the Sector of on-board and ground control systems of aircraft engines
<b>Земсков Андрей Александрович</b> – заместитель директора инжинирингового центра «Авиационные приводы»	<b>Zemskov Andrey Aleksandrovich</b> – deputy director of engineering center «Aviation Drives»
<b>Куц Михаил Сергеевич</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент кафедры основ конструирования машин МГТУ им. Н.Э. Баумана kuts@bmstu.ru	<b>Kuts Mikhail Sergeevich</b> – candidate of technical sciences, senior researcher, associate professor of the Department of fundamentals of machine design of Bauman Moscow State Technical University

Получена 17.06.2022