

# РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

**Боеготовность многих систем вооружения напрямую зависит от надежности основных элементов входящих в их состав газотурбинных двигателей. Однако традиционные средства технического диагностирования этих сложных механизмов не обеспечивают в полной мере эффективный контроль их состояния и, главное, требуют большого объема сборочно-разборочных работ. От этих недостатков свободны разработанные в последние годы радиолокационные системы диагностирования, которые осуществляют автоматический контроль подвижных механизмов в процессе их функционирования. Метод, положенный в их основу, удостоен в 1995 году Серебряной медали на Брюссельской выставке изобретений и ноу-хау и защищен двумя патентами РФ.**

Газотурбинные двигатели (ГТД) – одна из самых сложных механических систем, широко применяемых сегодня в силовых и двигательных установках различного назначения (самолетов, вертолетов, беспилотных летательных аппаратов, судовых основных и вспомогательных установках, системах автономного электропитания и пр.). Совокупность технико-эксплуатационных характеристик ГТД выгодно отличает их от двигателей других типов. Элементы проточной части ГТД (роторные колеса, лопатки, камера сгорания и пр.) эксплуатируются в условиях тепловых и силовых нагрузок, находящихся на верхнем допустимом пределе, и не гарантированы от попадания в них посторонних предметов (песка, камней, птиц, льда, воды и пр.), что обуславливает высокую долю их отказов в общем числе отказов двигателя. К особенностям ГТД, кроме того, относятся отсутствие резервных деталей и узлов, а также высокая стоимость (10–30% от общей стоимости изделия). Разрушение любого основного элемента двигателя, как правило, приводит к потере его работоспособности и, как следствие, – к утере боеготовности образца вооружения, на котором он установлен, и к значительным финансовым затратам на последующий ремонт (например, до 50% затрат на техническое обслуживание и ремонт современных самолетов приходится на долю их двигателей).

М.Критенко, А.Масловский,  
Л.Меньшиков, В.Москаленко

Поэтому весьма актуальной была разработка новых средств автоматического диагностирования состояния проточной части ГТД – радиолокационных систем. Эти новые средства используют последние достижения электронной техники, теории обработки сигналов, распознавания образов и принятия решения, что позволяет им выдавать информацию о состоянии проточной части ГТД в процессе его функционирования.

Принцип действия радиолокационных систем диагностирования основан на излучении электромагнитных колебаний определенной структуры в направлении движущихся диагностируемых элементов

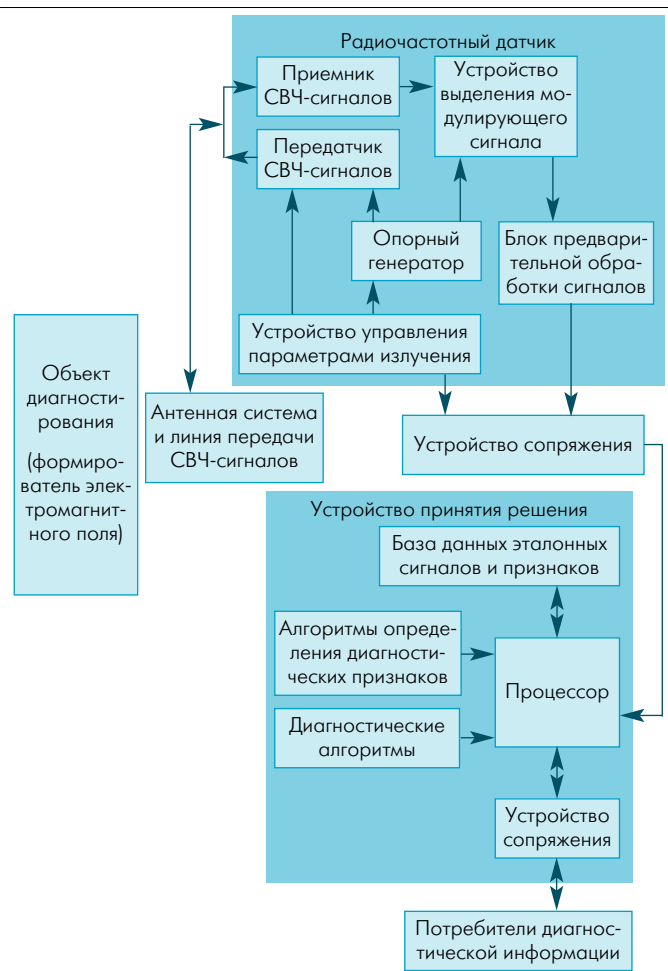
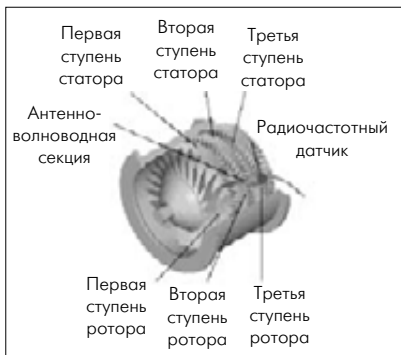


Рис.1. Структурная схема радиолокационной системы диагностирования



**Рис.2. Схема размещения датчика на компрессоре ГТД**

сигналов могут быть определены относительные или абсолютные параметры движения диагностируемых элементов (частота вращения или колебания, изменение периодичности и скорости движения и т.п.) и изменение их формы или размеров (износ, разрушение, нагар, эрозионные образования и т.п.).

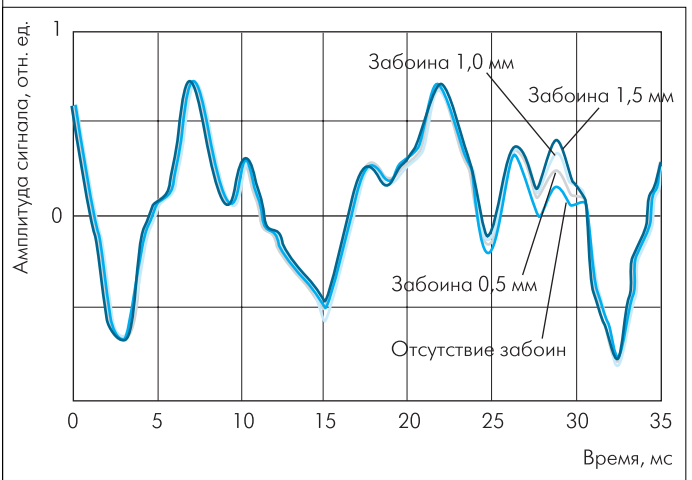
В общем случае в состав радиолокационной системы диагностирования входят антенно-волноводная секция, радиочастотный датчик, устройство сопряжения и устройство принятия решения (рис.1). Основным элементом системы диагностирования, в наибольшей степени определяющий ее метрологические и эксплуатационные свойства, – радиочастотный датчик, который обеспечивает формирование электромагнитных колебаний требуемой структуры, их излучение, последующий прием, преобразование и первичную обработку сигналов.

При использовании радиолокационных систем для диагностирования проточной части ГТД через отверстие в корпусе двигателя (например, для эндоскопического осмотра) устанавливается антенно-волноводная секция, выход которой выступает внутрь проточной части на 1–8 мм и располагается между статорными лопатками воздушоспрямяющего аппарата (рис.2). При установке однопозиционного радиочастотного датчика на внешней поверхности ГТД антенно-волноводная секция обеспечивает передачу от него электромагнитных сигналов, их излучение в область дислокации диагностируемых элементов проточной части, прием сигнала, обусловленного электромагнитным полем, который сформирован в результате многократных отражений, и его передачу на вход приемника. При установке двух- или многопозиционных датчиков излучение осуществляется через одну антенно-волноводную секцию, а прием – через другую (другие). Облучение разных элементов проточной части происходит с различной интенсивностью, что обусловлено их различной удаленностью от излучателя, ориентацией в пространстве и затенением соседними элементами. Наибольший вклад в формирование результирующего электромагнитного поля вносят элементы, находящиеся в зоне “прямой видимости”, – статорные лопатки, между которыми располагается антенный ввод, и отдельные фрагменты нескольких лопаток ближайших ступеней ротора.

Сигнал на выходе радиочастотного датчика определяется взаимным положением отражающих элементов проточной части относительно передающей и приемной антенн и изменяется при от-

клонении от эталонных размеров, положения или отражающих характеристик отдельных элементов. При отсутствии дефектов (т.е. при неизменных геометрических характеристиках отражающих элементов) форма сигнала, получаемого от датчика, стабильна и имеет период повторения, равный периоду вращения вала ротора. В случае возникновения дефектов, связанных с изменением геометрических размеров диагностируемых элементов (из-за забоин, трещин, обрыва, отложений, эрозионного износа лопаток ротора и т.д.), происходит изменение формы сигнала от радиочастотного датчика на временном интервале, соответствующем прохождению дефектного элемента мимо приемоизлучающей антенны (рис.3). Это изменение сигнала положено в основу работы системы автоматического диагностирования, в которой сигналы от датчиков сопоставляются с эталонными (от заведомо исправного двигателя).

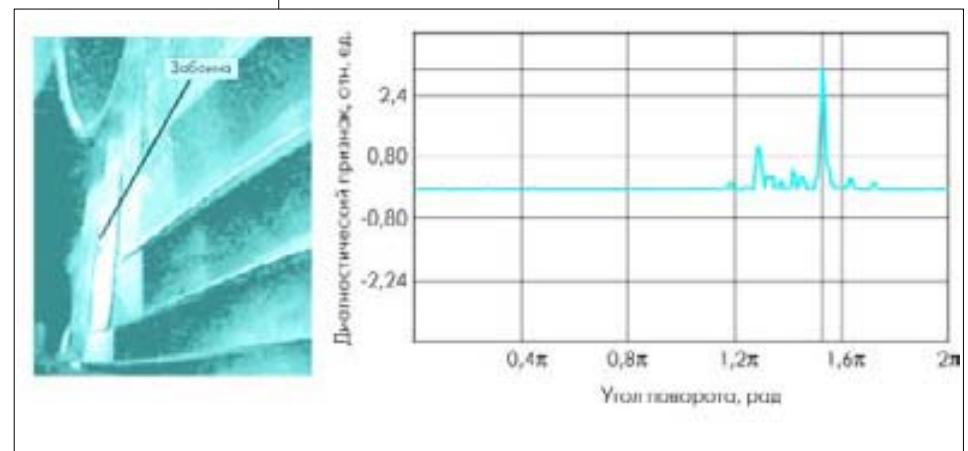
и регистрации сигнала, который обусловлен электромагнитным полем, сформированным этими элементами и их окружением. Параметры поля определяются конструктивными и кинематическими характеристиками отражающих элементов. В зависимости от назначения радиолокационных систем в результате последующей обработки



**Рис.3. Изменение сигнала радиочастотного датчика при возникновении и увеличении забоины передней кромки роторной лопатки**

Такая система не только устанавливает наличие забоин (рис.4а), но и определяет число дефектных лопаток (соответствует числу значительных “всплесков” диагностического признака на графике (рис.4б)), их местоположение (номер дефектной лопатки соответствует положению “всплесков” относительно первой лопатки, принятой за нуль по оси абсцисс) и размер (по значению диагностического признака). Благодаря этому могут быть приняты меры, адекватные опасности обнаруженного дефекта.

В ряде случаев возможно такое построение диагностической системы, при котором сигнал от радиочастотного датчика определя-



**Рис.4. Забоина передней кромки лопатки (а) и зависимость диагностического признака от угла поворота ротора (б)**



ется геометрическими характеристиками лопаток только одной ступени компрессора. Поскольку лопатки одного рабочего колеса компрессора идентичны друг другу, обнаружение дефектов и их локализацию можно проводить путем сравнительного анализа фрагментов сигнала от датчика длительностью  $t = F_{BP}/n$  (где  $F_{BP}$  – частота вращения ротора,  $n$  – число лопаток рабочего колеса). Если дефекты отсутствуют, различие между сигналами, соответствующими одной лопатке, минимально. При возникновении дефектов и росте их размеров увеличиваются различия между сигналами от разных лопаток. Преимущество данного способа принятия диагностического решения состоит в использовании не абсолютных, а относительных измерений (сигнал от каждой лопатки сравнивается с сигналом от соседних лопаток, полученным в ходе одного и того же измерения). Такой алгоритм диагностирования позволяет отказаться от измерения характеристик исправного двигателя (получения эталонного сигнала) и обеспечить диагностирование ГТД, информация о котором не могла быть получена ранее.

Система позволяет проводить оценку биений вала ротора, износа или разрушения подшипников с использованием как абсолютных, так и относительных измерений. Биения проявляются в возникновении дополнительной низкочастотной модуляции из-за синхронного изменения траектории движения всех лопаток турбины. При установке радиочастотного датчика в отверстиях, расположенных ближе к дефектному подшипнику, амплитуда дополнительной модуляции увеличивается, что позволяет автоматически обнаруживать дефектный подшипник при одновременном использовании нескольких датчиков или последовательной установке одного и того же датчика в разных смотровых люках.

Нагар и отложения на лопатках приводят к изменению параметров их отражательных характеристик и, как следствие, – к изменению спектра сигналов, получаемых от радиочастотных датчиков. Это происходит благодаря вариациям вклада в результирующий сигнал высокочастотных доплеровских составляющих, возникающих в результате “вторичных”, “третичных” и т.д. отражений. По изменению ширины спектра можно судить о степени загрязнения.

Таким образом, системы технического диагностирования, основанные на проведении радиочастотных измерений с использованием различных диагностических алгоритмов, способны обнаружить и в ряде случаев определить параметры практически всех встречающихся дефектов проточной части газотурбинных двигателей. Основные преимущества этих систем состоят в следующем.

- Измерения по своей сути – бесконтактные, т.е. не оказывают никакого влияния на контролируемое изделие или процесс.
- Полезный сигнал формируется непосредственно диагностируемыми элементами без промежуточного преобразования и передачи, как, например, в системах виброакустического диагностирования, где он претерпевает искажения в процессе прохождения от дефектного элемента к датчику.
- Диагностирование газотурбинных двигателей происходит в реальном масштабе времени в штатных режимах работы и в широком диапазоне частот вращения вала ротора, что обеспечивает обнаружение и определение характеристик практически всех типов дефектов проточной части ГТД.
- Конструктивное выполнение радиочастотных датчиков может быть различно: для постоянного размещения на двигателе или для оперативной установки. Это позволяет создавать системы диагностирования как для мониторинга двигателя, так и для его периодической проверки оператором в процессе эксплуатации. В первом случае на двигателе устанавливается один или несколько датчиков (рис.5), которые постоянно измеряют параметры проточной части



**Рис.5. Радиочастотный датчик для постоянного мониторинга**

ГТД и способны обнаруживать не только появление дефектов, но и прохождение через двигатель посторонних предметов (песка, града, птиц) или возникновение помпажа. Благодаря использованию антенно-волноводных секций различной конструкции длиной до 3–8 м датчики можно размещать на удалении от самых горячих и вибрирующих участков двигателя, что повышает их надежность и системы в целом. Периодическое (предполетное) диагностирование двигателя производится с помощью датчика, выполненного в переносном варианте (рис.6). Конструкция датчика позволяет оперативно подключать его к установленному в отверстии корпуса двигателя антенному вводу (рис.7) и измерять параметры элементов проточной части при раскрутке ротора в режиме малого газа или от стартера. Решение об исправности двигателя принимается оперативно при помощи подключаемого к датчику автономного процессора, который также осуществляет запись информации для последующей обработки в диагностическом центре.



**Рис.6. Переносная система диагностирования**

- Диагностирование проточной части ГТД обеспечивается малым числом датчиков (в предельном случае одним), что обусловлено особенностями распространения электромагнитных колебаний через роторные колеса и спрямляющий аппарат ГТД.



**Рис.7. Датчик, установленный на корпусе компрессора**

- Для монтажа датчиков во многих случаях не требуется доработка двигателя. Волноводы могут иметь длину до нескольких метров, что позволяет устанавливать датчики в удобном для монтажа и обслуживания месте.
- Использование систем диагностирования не требует проведения сборочно-разборочных и сложных подготовительных работ.

Широкие потенциальные возможности радиолокационных систем диагностирования в сочетании с многообразием вариантов конструктивного исполнения датчиков обеспечивают создание систем контроля технического состояния с высокими эксплуатационными и техническими характеристиками, оптимизированных для различных типов машин и механизмов.

#### ЛИТЕРАТУРА

Пат. 2036442 РФ. Способ диагностики состояния механизма в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления/А.Л.Горелик, В.К.Алексеев, И.В.Егоров, А.В.Масловский, Л.Г.Меньшиков, А.Б.Тягунов, Е.Г.Перепелицин. Приоритет 27.05.95.

Пат. 2112936 РФ. Способ диагностики технического состояния механизма в процессе его эксплуатации и устройство для его осуществления/ А.Л.Горелик, А.В.Масловский, Л.Г.Меньшиков, Е.Г.Перепелицин, А.Б.Тягунов, С.С.Эпштейн. Приоритет 10.06.98.



## Японский проект микроразвода

С 1991 года в Японии разрабатывается проект микроразвода, который входит в национальную программу перспектив развития прикладных наук и технологий, проводимую под эгидой Министерства внешней торговли и промышленности. По определению микроразвод – это завод размером со стол плюс новая технология производства микроизделий. Он состоит из миниатюрного технологического оборудования, в которое входят обрабатывающее оборудование, конвейеры, дозирующие устройства, насосные агрегаты, манипуляторы, система управления и датчики контроля. На сегодняшнем этапе проекта создается типовая модель микроразвода с технологиями механической микрообработки, предполагаемые объекты производства которого:

- *устройство технического обслуживания электростанций.* Предназначено для проведения контроля и ремонта внутренних сторон узких (диаметром 10–20 мм) трубопроводов теплообменников. Под управлением СВЧ-сигналов устройство перемещается как горизонтально, так и вертикально внутри металлических трубопроводов, в том числе и по изогнутым участкам. ПЗС-микрокамера и связной прибор позволяют идентифицировать элементы повреждения и передавать данные изображения;
- *микроразводная система, предназначенная для коммерциализации различного технологического оборудования по изготовлению миниатюрных изделий.* Координирует все процессы механической обработки, сборки, транспортировки, контроля и т.п.;
- *система медицинского диагностирования и лечения.* Минимизирует ущерб, наносимый телу больного при диагностировании болезни и проведении хирургической операции. При изготовлении миниатюрных изделий (на милли- и микрометровом уровне) микроразвод имеет ряд колоссальных преимуществ перед заводом обычного типа:
- значительная экономия пространства и электроэнергии благодаря миниатюризации технологического оборудования;
- соответственно и снижение стоимости изготовления благодаря сокращению потребления электроэнергии. Если линейные размеры оборудования в X раз меньше обычного, то потребление энергии для привода ниже в  $X^3$  раз, для освещения – в  $1,5X^3$  раз, а для кондиционирования воздуха – в  $3X^3$ ;
- простота изменения схемы размещения технологического оборудования. Благодаря небольшим массам и габаритам очень легко изменять схему его расположения, что к тому же сокращает необходимое для этого время простоя;
- сокращение цикла разработки новой продукции. В отличие от обычного производства, на микроразводе при разработке новой продукции можно использовать одно и то же миниатюрное оборудование как на стадии разработки, так и на стадии производства;
- возможность производства в особых условиях окружающей среды. Миниатюрное оборудование можно поместить в экологически чистые условия, в среду инертных газов, в вакуумные и свободные от микроорганизмов камеры, а в будущем – и на космические станции, в условия невесомости.

Уже создан опытный образец микроразвода, в котором интегрированы участки обработки, сборки и транспортировки. Общие габариты 1035x735x900 мм. Участок обработки содержит электромеханическое оборудование, использующее сканирующий туннельный микроскоп (разрешение – порядка микрометра), а также прибор для мониторинга и контроля результатов обработки. В участок сборки входят микроманипулятор, держатели, микродиспенсер, прибор для мониторинга и контроля. Участок транспортировки использует конвейер, в который вмонтированы палеты с постоянными магнитами.

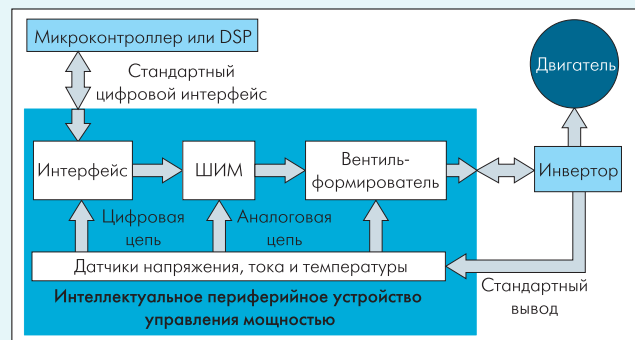
На основе результатов работы опытного образца будут разрабатываться микроразводы другого назначения.

JETRO, 2000, sept., p. 11–17

## Система управления двигателем на СБИС

### фирмы International Rectifier

В новой архитектуре системы управления двигателем функция драйвера инвертора отделена и выполняется так называемым интеллектуальным периферийным устройством контроллера



или DSP, содержащим ряд ИС высокой степени интеграции, в том числе – датчик тока IR2171, вентиль-формирователь IR2137, стабилизатор напряжения IR4021. Устройство предназначено на 3,75 кВт, но может применяться в конструкциях вплоть до 20 кВт. Программное обеспечение DSP загружается с web-сайта фирмы.