

УДК 629.3.062.3

А.В. МАСЛОВСКИЙ

ООО «Радарные технологии – 2Т», Москва, Россия

### ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ГТД

Рассмотрены особенности построения и применения радиолокационных систем для решения различных задач по контролю состояния и диагностике газотурбинных двигателей в процессе их функционирования. Приведены примеры использования этих систем для определения частоты вращения, измерения параметров вибрации, радиальных зазоров, обнаружения прохождения через проточную часть посторонних предметов, а также обрыва, разрушения и коробления роторных лопаток ГТД.

**контроль состояния, диагностика, неконтактные методы, радиолокатор, эксплуатационные дефекты, радиальный зазор, СВЧ колебания, вибрация**

Одним из неперенных условий реализации перспективных методов технического обслуживания газотурбинных двигателей (ГТД) является широкое использование совокупности различных методов и средств технической диагностики, которые должны обеспечить обнаружение дефектов на ранней стадии их развития для обеспечения своевременного проведения ремонтных работ и недопущения аварии.

Анализ эксплуатационных дефектов элементов проточной части показывает, что они обуславливают до 19...57% отказов газотурбинных двигательных и силовых установок.

Подавляющее большинство дефектов проточной части ГТД, характеризуется изменением геометрических характеристик отдельных элементов (обрыв, разрушение, трещины, забоины, нагар, эрозивный и абразивный износ, искривление роторных и статорных лопаток, прогар камеры сгорания и пр.) или их кинематических параметров (помпажные явления, возрастание уровня колебаний лопаток, изменение параметров вибрации, биение вала ротора, неравномерность вращения и др.).

Для оценки состояния элементов проточной части наиболее широко используются неконтактные и виброакустические средства, которые, несмотря на свои очевидные преимущества, не в полной мере обеспечивают достоверный оперативный контроль

элементов ГТД. Одним из факторов сдерживающих применение названных систем на «горячих» частях двигателя является ограниченный диапазон рабочих температур их первичных датчиков.

В последние годы получил развитие метод контроля состояния и диагностики ГТД, основанный на использовании радиолокационных измерений, который обеспечивает автоматический контроль состояния подвижных элементов в процессе функционирования ГТД без проведения сборочно-разборочных работ [1].

Принцип действия радиолокационной измерительной системы основан на излучении при помощи передатчика электромагнитных колебаний определенной структуры (частотный диапазон 3...60 ГГц) в направлении движущихся диагностируемых элементов и регистрации при помощи приемника сигнала, который обусловлен электромагнитным полем, сформированным в результате отражений от диагностируемых элементов и их окружения. Параметры этого поля определяются конструктивными и кинематическими характеристиками отражающих элементов. В зависимости от назначения радиолокационных систем, в результате последующей обработки могут быть определены относительные или абсолютные параметры движения диагностируемых элементов (частота вращения или колебания, изме-

нение периодичности и скорости движения и пр.) и (или) определен факт изменения их формы или размеров (износ, разрушение, коробление, нагар, накипь, изменение радиального зазора и пр.).

В общем случае в состав радиолокационной измерительной системы (рис. 1) могут входить: антенны, линии передачи сигналов, приемо-передатчик СВЧ сигналов, а также модуль управления, питания и обработки.

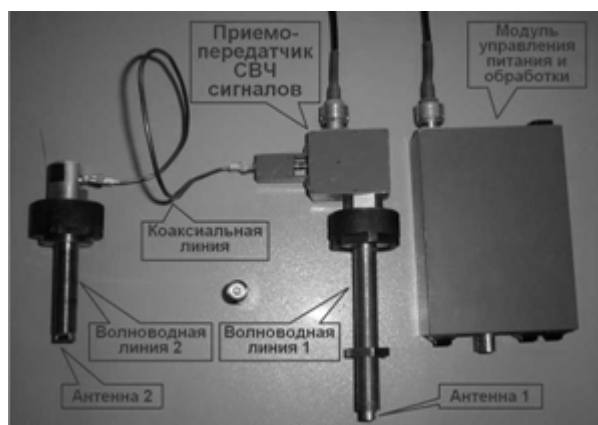


Рис. 1. Состав радиолокационной системы

Антенны служат для излучения электромагнитных колебаний в направлении диагностируемых элементов и приема отраженного сигнала. Линии связи обеспечивают передачу электромагнитных колебаний от СВЧ приемо-передатчика (радиолокационного датчика) к антеннам и обратно.

Радиолокационный датчик (РЛД) формирует электромагнитные сигналы, поступающие в антенно-волноводную систему, а также осуществляет прием и первичную обработку отраженных сигналов. Параметры РЛД (частотный и динамический диапазон, вид модуляции, принцип обработки отраженных сигналов и пр.) в наибольшей степени определяют метрологические и эксплуатационные свойства радиолокационной системы контроля состояния и диагностики ГТД.

С использованием модуля управления, питания и обработки осуществляется выбор режима работы РЛД, преобразование поступающего с выхода РЛД низкочастотного сигнала (усиление, нормализация, фильтрация, синхронизация и пр.). Вычислитель,

который может быть выполнен в составе указанного или самостоятельного модуля, определяет параметры отраженного сигнала и трансформирует их в пространство признаков, которое используется для решения той или иной контрольно-диагностической задачи.

Для контроля проточной части ГТД с помощью радиолокационной системы через отверстие в корпусе, используемое, например, для проведения эндоскопического осмотра, монтажа пирометра, датчика давления или другого штатного датчика, устанавливается антенна, которая выступает внутрь проточной части на 0...4 мм. Сигнал на выходе радиолокационного датчика определяется взаимным положением отражающих элементов проточной части относительно передающей и приемной антенн (приемо-передающей антенны) и изменяется при отклонении размеров, положения или отражающих характеристик отдельных элементов.

При функционировании ГТД за счет вращения вала ротора происходит постоянное изменение положения элементов ротора (рис.2) относительно передатчика и приемника (в наибольшей степени облучаются те или иные фрагменты различных роторных лопаток), что приводит к изменению сигнала на выходе радиолокационного датчика.

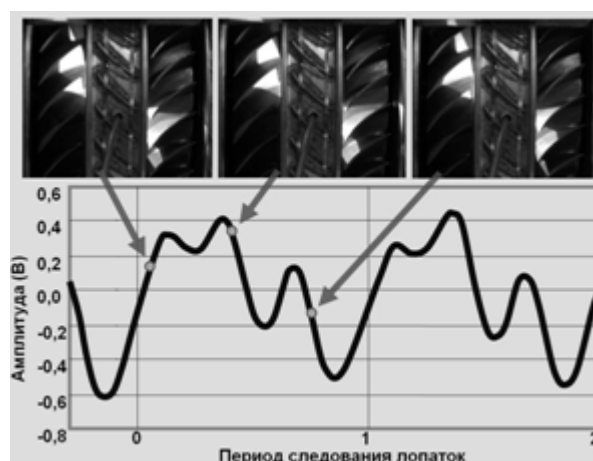


Рис. 2. Принцип формирования сигнала

В случае отсутствия дефектов (неизменных геометрических характеристиках отражающих элементов, а также траектории и скорости их движения)

форма сигнала, получаемого от РЛД, стабильна и неизменна. При возникновении дефектов, связанных с изменением геометрических размеров диагностируемых элементов (забоины, трещины, обрыв, отложения, эрозивный износ лопаток ротора и пр.) или их взаимного положения, происходит изменение формы поступающего от радиолокационного датчика сигнала на временном интервале, соответствующем прохождению дефектного элемента мимо приемоизлучающей антенны.

В результате обработки сигналов [2] может быть определено количество дефектных лопаток, их местоположение и оценен размер дефекта (рис. 3).

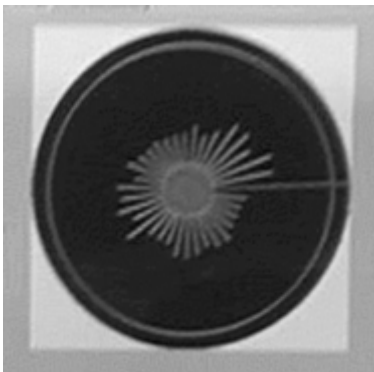


Рис. 3. Экран системы обнаружения забоин

Для решения некоторых контрольно - диагностических задач необходимо определение мгновенной частоты вращения роторов ГТД. Такие измерения могут быть выполнены с использованием радиолокационных систем. На рис. 4 приведена сонограмма (по вертикальной оси частота, по горизонтальной – время, интенсивность черного цвета зависит от уровня спектральной составляющей) сигнала РЛД, полученного при установке антенны между турбинами высокого и низкого давления, которые имеют между собой газодинамическую связь.

Из рисунка видно, что в первый момент после запуска стартера наиболее интенсивны узкополосные гармоники лопаточной частоты ТВД (вращается только турбина высокого давления). После начала раскрутки ТНД каждая из гармоник ТВД раскладывается на несколько составляющих, частоты  $f_i$  кото-

рых определяется как  $f_i = n f_{ТВД} \pm m f_{ТНД}$ , где  $f_{ТВД}$  – лопаточная частота ТВД,  $f_{ТНД}$  – лопаточная частота ТНД,  $n, m = 0, 1, 2, 3, \dots$ , и появляются гармоники обусловленные ТНД. Анализ подобных сонограмм сигналов, полученных от РЛД с одной антенной, позволяет с высокой точностью определять мгновенную частоту вращения обоих валов газогенератора в произвольный момент времени.

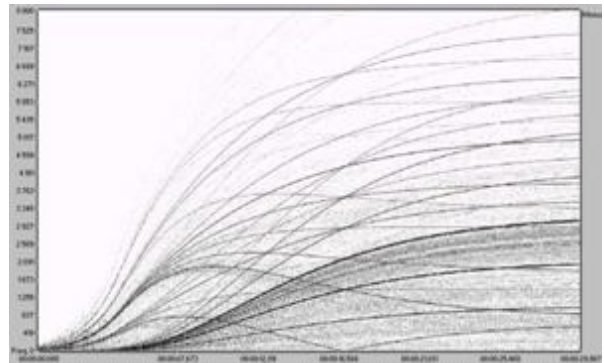


Рис. 4. Сонограмма, полученная при запуске ГТД

Использование радиолокационных систем для измерения частот вращения, скольжения и времени выбега может быть реализовано при различных схемах проведения измерений, не требует оптимизации параметров радиолокационных датчиков и может выполняться наряду с решением других контрольно-диагностических задач.

Простейшие РЛД могут также использоваться для измерения параметров колебаний неподвижных лопаток. На рис. 5 приведены последовательности амплитудных спектров сигналов (режим «водопад»), полученных от тензодатчика (вверху) и радиолокационного датчика (внизу) при перестройке частоты вибростенда в районе резонансной частоты турбинной лопатки. Как видно из приведенных спектров полученные по двум различным каналам зависимости совпадают.

С использованием РЛД также возможна оценка уровня колебаний роторных лопаток вращающегося колеса, однако при этом требуется реализация более сложной схемы измерений, алгоритмов обработки сигналов и оптимизации места установки антенных систем.

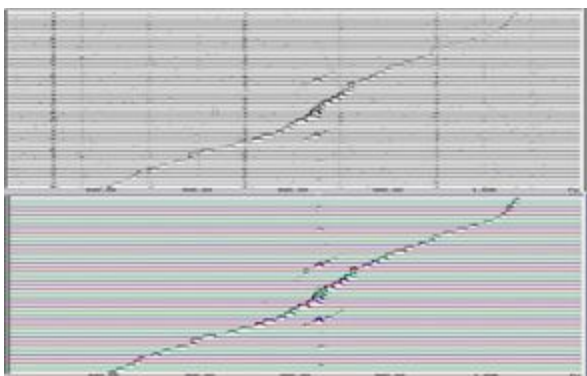


Рис. 5. Спектры сигнала от тензодатчика и РЛД

В ряде случаев, возможно такое построение радиолокационной измерительной системы [3], которое обеспечивает измерение радиального зазора между торцом роторных лопаток и корпусом ГТУ (раскрытом антенной системы). На рис. 6 показана экспериментально полученная зависимость величины двух параметров радиолокационного сигнала от радиального зазора, изменяющегося в диапазоне 0...3,3 мм с шагом 0,15 мм. Как видно из приведенных зависимостей, совместное использование данных признаков позволяет однозначно определить значение радиального зазора в указанном диапазоне.

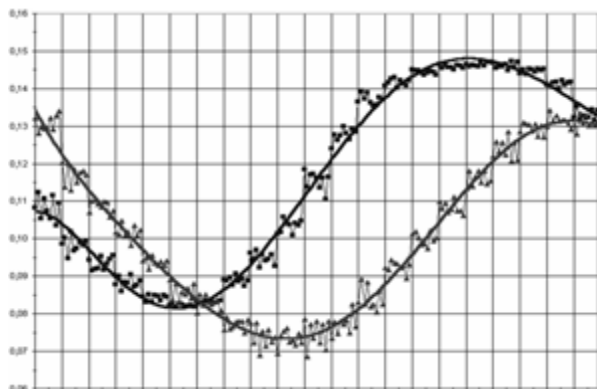


Рис. 6. Измерение параметров сигнала РЛД от величины радиального зазора

Работы по исследованию возможности применения радиолокационных систем для обнаружения прохождения через проточную часть посторонних предметов (песка, камней, металлических предметов или опилок) ведутся во многих странах [4]. Экспериментальные исследования, выполненные на реальном ГТД, показали, что при прохождении через проточную часть посторонних предметов в выход-

ном сигнале РЛД возникает интенсивная случайная составляющая, которая может значительно превышать уровень сигнала в нормальных условиях и имеет широкополосный спектр. На рис. 7 приведены реализация выходного сигнала РЛД (вверху), антенна которого установлена в смотровом лючке между второй и третьей ступенями компрессора, и его сонограмма (внизу), полученные во время прохождения через проточную часть ГТД металлических опилок. Для повышения вероятности обнаружения прохождения небольших одиночных посторонних предметов необходимо устанавливать по периметру входа ГТД несколько антенных систем и оптимизировать параметры РЛД.

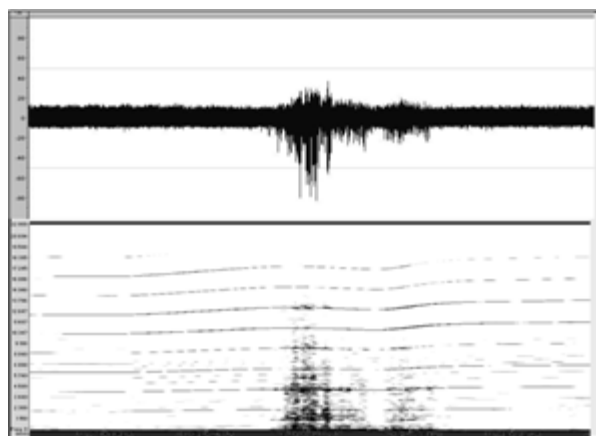


Рис. 7. Сигнал РЛД и его спектр, полученные при прохождении через проточную часть металлических опилок

Перечень контрольно-диагностических задач, которые могут решаться с использованием радиолокационных систем не ограничивается приведенными примерами. В ряде случаев, один и тот же радиолокационный датчик может использоваться для, например, обнаружения повреждений роторных лопаток, определения частоты вращения ротора, обнаружения повышенного уровня колебаний роторных лопаток и обнаружения прогара внешнего корпуса камеры сгорания. Настройка измерительной системы на решение тех или иных задач может быть выполнена без изменения аппаратной части за счет модификации программного обеспечения.

В системах радиолокационной диагностики используют передатчики с выходной мощностью не

более 5 ...40 мВт, а излучение СВЧ энергии осуществляется во внутреннее пространство ГТУ, металлический корпус которой является экраном для электромагнитных волн. Поскольку на оператора, даже при его ошибочных действиях воздействует электромагнитное излучение с плотностью потока мощности не превышающей  $10 \text{ мВт/см}^2$ , специальных требований к технике безопасности при работе с системами радиолокационной диагностики в подавляющем большинстве случаев предъявлять не требуется.

Основные преимущества систем контроля состояния и диагностики, основанных на использовании радиолокационных систем состоят в следующем:

- измерения, по своей сути, являются неконтактными и не оказывают влияние на контролируемый элемент или процесс;

- полезный сигнал формируется непосредственно диагностируемыми элементами без промежуточного преобразования и передачи;

- радиолокационные системы являются активными, т.е. используют зондирующий сигнал, изменяя параметры которого можно адаптировать систему для решения тех или иных контрольно-диагностических задач на различных типах ГТД;

- радиолокационные системы способны обеспечить измерения в реальном масштабе времени в штатных режимах их работы в широком диапазоне частот вращения вала ротора;

- радиолокационные датчики могут быть изготовлены либо для постоянного размещения на двигателе, либо для оперативной установки, что позволяет обеспечить мониторинг двигателя или его периодическую проверку в процессе эксплуатации;

- для монтажа радиолокационных датчиков во многих случаях не требуется доработка ГТД. Облучение контролируемых элементов проточной части и прием отраженных сигналов может осуществляться через имеющиеся в корпусе двигателя отверстия, например, отверстия для эндоскопов;

- использование длинных линий связи (длиной до нескольких метров) позволяет диагностировать труднодоступные и горячие элементы ГТУ, размещая РЛД на необходимом удалении, обеспечивающем «комфортные» условия его работы;

- использование радиолокационных систем не требует проведения сборочно-разборочных и сложных подготовительных работ.

Высокие потенциальные возможности радиолокационных измерительных систем в сочетании с многообразием вариантов конструктивного исполнения радиолокационных датчиков позволяют создать системы контроля состояния и технической диагностики, которые оптимизированы для различных типов газотурбинных двигателей и различных этапов их жизненного цикла. В ряде случаев эти системы могут легко интегрироваться в существующие контрольно-диагностические системы и обеспечить прирост эффективности работы этих систем, за счет использования особенностей дополнительного (радиолокационного) физического поля.

## Литература

1. Масловский А.В. Определение состояния проточной части компрессоров газотурбинных двигателей с использованием радиоволновых измерительных систем // Вопросы оборонной техники. Серия 3. – 2000. – Вып. 3 (298). – С. 1-50.
2. Патент России №2267094 от 27.12.2005 г., приоритет от 04.10.2004 г. «Способ и устройство оперативной диагностики механизма» / А.Л. Горелик, И.М. Мармалюков, А.В. Масловский, Л.Г. Меньшиков.
3. Супряга Н.П. Радиолокационные средства непрерывного излучения. – М.: Воениздат, 1974. – 344 с.
4. Engine-mounted radar to detect FOD ingestion // Flight International, 09.08.2005.

*Поступила в редакцию 31.05.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Л. Горелик, Центральный институт экономики, информатики и систем управления, Москва.