

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОВОЛНОВОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. В. Болоньев, М. Ю. Застела, Ф. Н. Мирсаитов

Введение

В течение ряда последних лет происходит переосмысление таких фундаментальных понятий, как надежность и безопасность. Если 20 лет назад на стадии становления Международного симпозиума «Надежность и качество», проводимого в г. Пенза (в 2015 г. юбилейное XX заседание ведущих ученых в этой области), основной подход можно было сформулировать следующим образом – надежность является одной из важных составляющих качества, то на упомянутом юбилейном заседании звучало – надежность является составной частью такого широкого понятия, как безопасность. Соответственно должен расширяться и круг задач, решаемых при оценке надежности сложных изделий. Уже недостаточно обеспечения надежности на стадии создания изделия, необходимо и далее поддерживать необходимый уровень надежности, обеспечивая их безопасную эксплуатацию. Успехи в области нелинейной термодинамики (Нобелевская премия 1977 г. И. М. Пригожину [1]) дали толчок к исследованиям быстропротекающих процессов в транспортных тепловых энергетических установках, позволили предсказать их состояние во время эксплуатации на доаварийных стадиях [2–4].

Объекты контроля. Транспортные тепловые энергетические установки (применительно к двигателям летательных аппаратов) целесообразно разделить на две группы: 1) жидкостные и твердотопливные реактивные двигатели космических летательных аппаратов; 2) газотурбинные авиационные двигатели.

Известны работы, описывающие успешное решение и диагностику внутрикамерных процессов в энергетических установках [2, 5, 6]. Если диагностика двигателей космических летательных аппаратов требует применения датчиков на короткий (секунды) и непродолжительный (минуты) промежуток времени и анализ производится путем измерения электронной концентрации плазмы пламени, то при диагностике газотурбинных авиационных двигателей датчик должен сохранять работоспособность в течение нескольких часов. В работах [7–9] отмечено, что информацию о состоянии двигателя можно получить с помощью измерения вибрационных параметров элементов и узлов турбин и компрессоров.

Известны работы, в которых названные выше параметры измерялись радиоволновыми методами (необходимо быстроедействие). Однако имеющиеся проблемы (сложность конструкционного сопряжения с двигателями, низкая помехозащищенность и эрозионная стойкость помешали их внедрению в функциональную (полетную) диагностику силовых установок. Нами разработан ряд способов и средств оперативной диагностики состояния энергетических установок методами зондирования рабочих камер двигателей сверхвысокочастотным излучением. Информационными параметрами являются электронная концентрация плазмы пламени, плотность теплового потока и вибрации подвижных частей (лопаток, турбин и компрессоров) газотурбинных двигателей. Регистрируется информативная высокочастотная составляющая часть спектров, меняющаяся при уходе объекта контроля от номинального режима. Выполняются условия о недопустимости внесения средствами контроля каких-либо возмущений в работу двигателей и конструктивная совместимость с эксплуатируемыми в настоящее время энергетическими установками [10–13].

Средства оперативной диагностики. Контроль электронной концентрации осуществлялся с помощью автогенераторного [10] или усовершенствованного варианта – автодинного датчиков. Работа их основана на эффекте изменения сопротивления излучения их антенн в зависимости от изменения диэлектрической проницаемости среды (изучаемого объекта).

Датчики состоят из генератора на диоде Гана с коаксиальным резонатором с кольцевой щелевой антенной в шорде. Алгоритм диагностического преобразования имеет вид

$$N \rightarrow E = 1 - (f_{\text{л}} / f)^2 \rightarrow Z_{\text{л}} \rightarrow f,$$

где E – диэлектрическая проницаемость; $f_{\text{л}}$ – ленглировская частота, являющаяся функцией заряда и масса электрона (физическая константа); $Z_{\text{л}}$ – реактивное сопротивление щели; f – зондирующая частота; N – концентрация электронов.

Таким образом, измеряя f , мы косвенно измеряем электронную концентрацию, причем не только среднее значение концентрации, но и оцениваем спектр ее флуктуаций как более информативный (по Пригожину) параметр $N \sim (10^{17} \dots 10^{18}) \text{ м}^3$, и при температуре (1500...2000) К спектр простирается до (6...9) МГц.

Для обеспечения комфортной температуры диоду в конструкцию названного датчика введен секционированный отрезок волновода. Его можно с позиций теории СВЧ назвать многозвенным резонатором. Вследствие чего принимается часть генерируемой мощности антенной и переход автогенератора в автодинный режим. Использование санкционирования волноводного отрезка устраняет срыв генерации при кратковременных увеличениях концентрации N при воспламенении в потоке металлических крошек [11].

Для контроля плотности теплового потока также используется автодинный датчик. Имеющиеся термодатчики обладают существенным недостатком – высокая инерционность и, следовательно, непригодность для измерения быстрых флуктуаций температуры пламени. В разработанном нами датчике чувствительным элементом является антенна. Это кольцевая щелевая антенна, прорезанная в тонкой (<0,1 мм) мембране. Вследствие флуктуации ширины щели меняется сопротивление антенны. Проведены исследования такого специфического теплового датчика. Мешающим фактором является собственное радиоизлучение пламени [12].

Автодинные вибродатчики. Отдельное, более полное рассмотрение автодинных вибродатчиков связано с рядом обстоятельств. Это – большое количество турбореактивных двигателей, эксплуатируемых в авиации, и также реальная возможность установить датчики в уже имеющемся двигателе, не подвергая конструкцию двигателя изменениям и не внося каких-либо возмущающих факторов в их работе. Отметим, что практически не существует универсальных специалистов в области воздушно-реактивных двигателей и радиотехники. Мы себя к ним (специалистам в области ВРД) также не относим. Однако работа в авиационном институте, где имеются как двигателисты, так и радисты, позволила нам поработать на стыке двух областей. Практика показала, что идея использования виброакустической диагностики среди двигателистов муссируется давно, имеются определенные наработки, что позволяет занять позицию: дадим им виброспектр, а затем они разберутся.

Отметим, что имеется множество статей и патентов различных авторов, направленных на решение одной задачи: установление статической или динамической формы лопатки (включая поломки и вибрации) или еще лучше для совокупности лопаток на рабочем колесе (компрессора или турбины). Перечень и серьезный обзор этих работ читатель найдет в [7]. Обратим внимание на то, что диагностику состояния элементов конструкции турбореактивного двигателя можно производить в одинаковых и достаточно благоприятных условиях для применения радиоволновых и, в частности, автодинных радиолокационных методов.

Реально можно выделить пять задач технической вибродиагностики, в которых контролируется состояние (в том числе вибросостояние) лопаток турбин и компрессоров:

- 1) опытно-конструкторская доводка нового ТТД, сертификация, производственный контроль с отбраковкой некондиционных лопаток;
- 2) профилактический стендовый контроль, выявление поломок (сколов, трещин);
- 3) функциональная (полетная) диагностика состояния рабочего колеса турбины (или компрессора) с выявлением сломанной или аномально вибрирующей лопатки;
- 4) вибродиагностика ротора (включая вал, опорные подшипники и т.д.) по изменению виброспектра совокупности лопаток на одном или нескольких рабочих колесах;
- 5) функциональная (полетная) диагностика проточного тракта ГТД (включая, например, камеру сгорания) по изменению (появлению аномалий) в виброспектре совокупности лопаток.

Авторы наиболее успешных работ используют дискретно-фазовый метод, позволяющий в частности, установить даже «номер» («имя») дефектной лопатки. При наличии соответствующего

комплекта вторичных приборов можно выявить и ее (лопатки) виброспектр, который по мнению авиаспециалистов содержит гораздо большее количество информации о состоянии двигателя (ГТД) [7].

К сожалению технические реализации этих методов, включая радиоволновые, в том числе радиолокационные (РЛ), требуют внесения существенных изменений в конструкцию проточного тракта ГТД (а кроме того, реализация средствами традиционной радиолокации и вовсе невозможна из-за тесноты тракта).

Предложенный в [13] метод основан на принципах сверхближней радиолокации (БРЛ) и предполагает отказ от формирования направленного радиоизлучения. Показано, что структура виброспектра адекватно отображает отклики возбужденного в секции проточного тракта электромагнитного поля.

В двух последних задачах лопатка или их совокупность рассматриваются (нами) в том числе и с позиции теории колебаний как чувствительные элементы довольно сложных по структуре датчиков, в состав которых входят также РВ (или РЛ) приемопередатчики. Здесь деталь контролируемого агрегата – лопатка, оставаясь исправной, сигнализирует о неисправности других деталей, недоступных для функциональной диагностики. Ранее подобный подход предложен в [8, 9], автор [7] рассматривает совокупность лопатки и автодинного локатора как единую автоколебательную систему. «Датчик» создан на ее основе.

Методы СБРЛ позволяют при такой постановке задачи обойти названные выше трудности и запреты. Используется особенность конструкции ГТД – наличие смотровых окон малого диаметра, позволяющих возбудить в каждой из ступеней проточного тракта (как в компрессоре, так и в турбине) локальные электромагнитные поля. Структура каждого из таких полей деформируется при вращении ротора. Одновременно изменяется и сопротивление антенны, расположенной в смотровом окне. Номинальному и нештатному движению рабочего колеса соответствуют различные спектры этого процесса.

Амплитуды вибраций каждой из лопаток или размеры ее деформации как аналитически, так и экспериментально установить весьма трудно. Но упомянутый и принятый в авиации подход этого не требует [2]. Аномалия в спектре, которая чаще всего выражается в появлении узкополосных всплесков, появляется уже в предаварийной ситуации.

Более того, о характере и степени неисправности авиаспециалисты судят по показаниям нескольких приборов. Давно разработаны и используются соответствующие программы [2], правда, в существующем виде в них используют разовые отсчеты, дающие очень малый объем информации в сравнении с РЛ сигналом. Отсюда интерес к предложенному методу.

Серьезное отличие в принципе диагностики и аппаратуре обусловлено отказами от выполнения традиционных задач: точного измерения амплитуды виброперемещений, в том числе траматической конфигурации лопаток. Внимание сосредоточено на выявлении и количественной оценке изменений виброспектра как отклика на 17 из 30 типичных неисправностей уже упомянутых узлов ГТД [4].

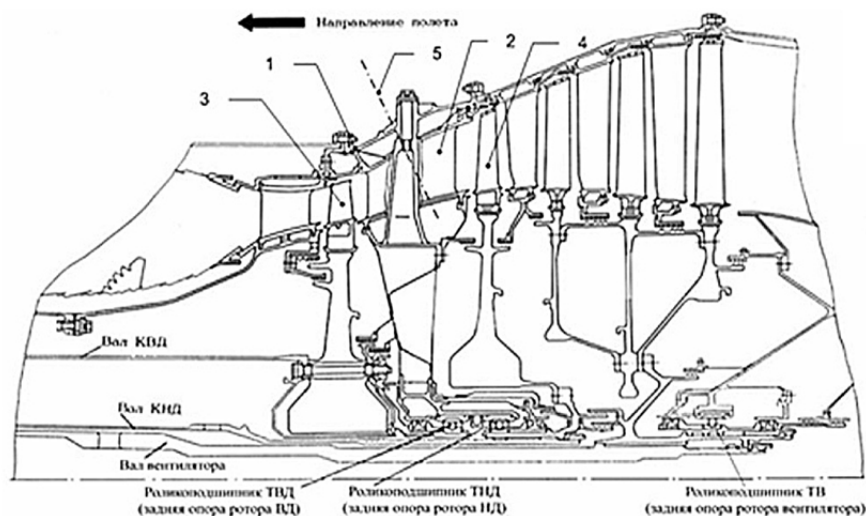


Рис. 1. Турбина ГТД Д-36

На рис. 1 представлен фрагмент конструкции турбины эксплуатируемого авиадвигателя Д-36, применительно к которому получены нижеприведенные результаты.

Объем проточного тракта ограничен в радиальном направлении стенкой статора 1 и валом и секционирован: по окружности – лопатками соплового аппарата 2, а в продольном направлении – рабочими колесами 3 с лопатками 4. В одной из таких секций на каждой ступени имеется смотровое окно ($D = 12$ мм, в мировой практике $D = 4 \dots 11$ мм) 5 для визуального стендового бороскопического осмотра состояния лопаток (в полете окно закрывают заглушкой). Эту секцию назовем диагностической камерой (ДК), а «стенку» лопатками 4 – диагностическим окном.

Датчик установлен в смотровом окне (выполняя одновременно роль заглушки) так, что раскрыв его невыступающей антенны обращен внутрь диагностической камеры (ДК). Структура возбужденного в ДК электромагнитного поля (ЭМП) зависит от конфигурации диагностического окна (т.е. от угла поворота рабочего колеса), формы, вибраций и поломок лопаток. Это позволяет преобразовать регулярное и вибрационное перемещение лопаток в параметры отраженного от камеры сигнала. Диагностическим параметром в данном случае является спектр этого сигнала.

Соответствующие функциональные зависимости установлены с применением программного продукта FEKO [14]. В частности, в квазистатистическом приближении вычислены пространственные распределения напряженности электромагнитного поля (ЭМП), токи на поверхности антенны и коэффициент отражения. Исследования проведены для двух датчиков: с кольцевой щелевой антенной [10–13] и с открытым концом круглого волновода. Диапазон зондирующих частот 22,7... 37, 47, 41 ГГц. Ниже представлены результаты для второго случая ввиду его явного преимущества.

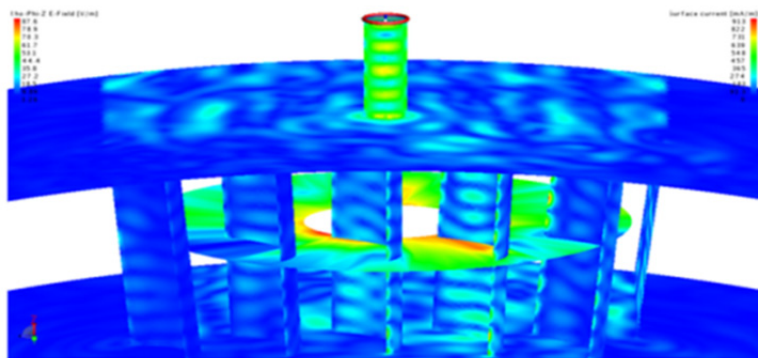


Рис. 2. Взаимодействие возбужденного ЭМП с лопатками

На рис. 2 качественно показано взаимодействие возбужденного ЭМП с лопатками и отображен тот факт, что в двигателе Д-36 в пределах диагностического окна видны одновременно пять лопаток (всего их на рабочем колесе 119). Горизонтальное «кольцо» условно отображает одно из сечений ЭМП.

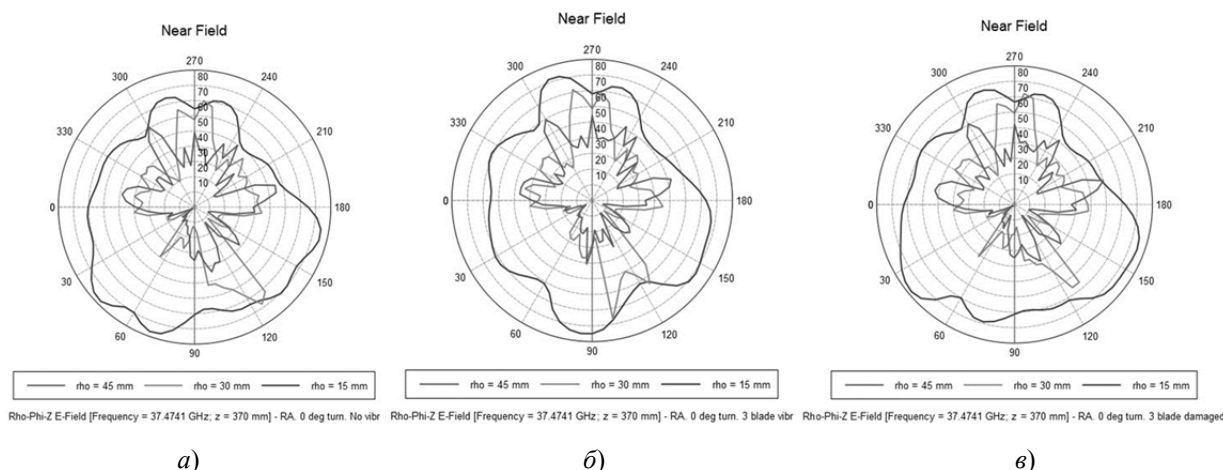


Рис. 3. Распределение напряженности ЭМП

Распределение напряженности ЭМП в единицах (мВт / м) в трех сечениях, на нормальных к оси антенны, представлено на рис. 3 (частота ~ 37 ГГц). Внешняя кривая соответствует сечению в 15 мм от антенны, две другие – сечениям в 30 и 45 мм. Представлены 3 состояния одной из лопаток: нормальное (*а*), деформированное крутильной вибрацией (поскольку перья лопаток зафиксированы бандажным кольцом) (*б*) и поломка лопатки (*в*).

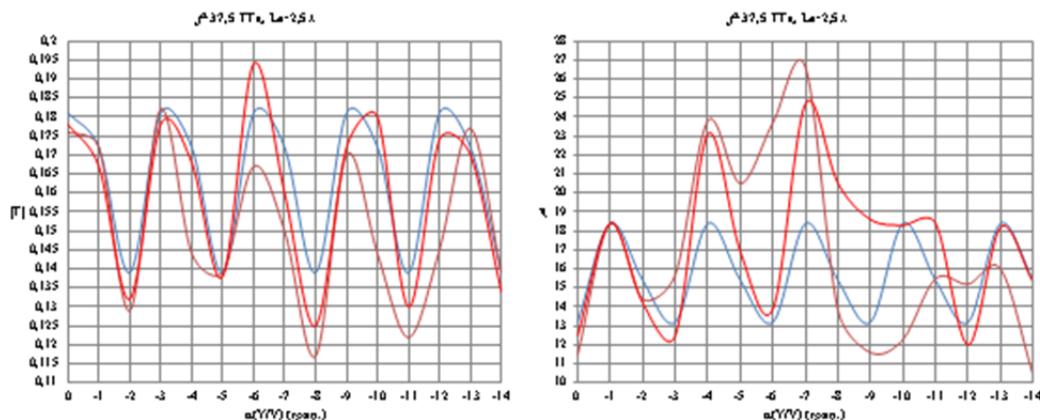


Рис. 4. Амплитуды и фазы коэффициента отражения

Для этих же ситуаций вычислен радиолокационный отклик в виде амплитуды и фазы коэффициента отражения (рис. 4). В качестве аргумента выбран угол поворота ротора, причем диапазон 14° соответствует размеру диагностического окна. Хорошо видно, что в регулярном режиме периодическое изменение амплитуды Γ и фазы φ отражения составляют 14 % (от среднего значения) и около 2.5° , то в неблагоприятных состояниях они изменяются (возрастают или уменьшаются) более чем в 2 раза по амплитуде и фазе. Для радиолокации это большие величины.

Таким образом на данном этапе исследований можно уверенно утверждать перспективы данного диагностического метода.

Диагностический режим и спектр отраженного сигнала изучены ранее [15].

Другими словами, мы в отличие от предшественников, отказываемся от традиционной дальнометрии (профилометрии), а интересуемся только изменением огибающей виброспектра.

Последующие диагностические операции имеют многочисленные аналоги в радиолокации и в нашем случае состоят из двух этапов: автодинного формирования сигнала радиолокационного отклика и анализа его спектра. Оба этапа описаны в [14].

В более широком плане диагностический алгоритм должен учитывать принятое в авиации правило: решение о степени опасности и о возможности продолжения полета принимается на основании сопоставления нескольких диагностических показателей [2]. Большинство из них в настоящее время представлены не спектрами, а числами. Поэтому введение дополнительного измерительного канала с широким спектром (т.е. быстродействующего и к тому же не требующего изменения конструкции двигателя) обещает повысить безопасность полетов.

Выработка полного диагностического алгоритма с учетом такого нововведения – дело авиаторов.

Список литературы

1. Пригожин, И. Нелинейная термодинамика. От двигателя до диссипативных систем / И. Пригожин, М. Канденуди. – М. : Наука, 2003. – 612 с.
2. Кеба, И. В. Диагностика авиационных газотурбин / И. В. Кеба. – М. : Транспорт, 1980. – 247 с.
3. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
4. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
5. Годунов, А. И. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / А. И. Годунов, С. В. Шишков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2 (6). – С. 62–70.

6. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
7. Дакилин, А. И. Дискретно-фазовые преобразователи перемещений элементов вращающихся узлов изделий машиностроения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.03 / Дакилин А. И. – Самара, 2011. – 280 с.
8. Якобсон, П. П. Особенности вибрац. диагностики газотурбинных установок / П. П. Якобсон. – URL: <http://www.vibroteck.ru/Russian/bibliotekas/>
9. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб. : СПбГМТУ, 2000. – 416 с.
10. Болознев, В. В. Датчик диэлектрической проницаемости потока ионизированного газа / В. В. Болознев, Ш. М. Чабдаров // ПТЭ. – 1992. – № 3. – С. 149–159.
11. Сафонова, Е. В. Теплостойкие СВЧ датчики систем контроля режимов горения : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Сафонова Е. В. – Казань, 2003. – 183 с.
12. Станченков, М. А. СВЧ датчик плотности теплового потока : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Станченков М. А. – Казань, 2012. – 170 с.
13. Мирсаитов, Ф. Н. Радиолокационный метод функциональной диагностики ротора газотурбинного авиадвигателя : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.14 / Мирсаитов Ф. Н. – Екатеринбург, 2014. – 157 с.
14. Банков, С. Е. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – М. : ЗАО «НПП Родник», 2009. – 209 с.
15. Мирсаитов, Ф. Н. Радиолокационная вибродиагностика газотурбинного авиадвигателя в условиях полета / Ф. Н. Мирсаитов, М. Ю. Застела, В. В. Болознев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 5–8.

Болознев Виктор Васильевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра радиоэлектронных и квантовых устройств,
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева
(420084, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)

Застела Михаил Юрьевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра радиоэлектронных и квантовых устройств,
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А. Н. Туполева
(420084, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10)

Мирсаитов Фанис Наилевич

кандидат технических наук,
директор департамента информационных технологий,
ООО «Тулпар-Техник»
(420306, Татарстан, Лаишевский р-н,
Аэропорт «Казань-2»)

Аннотация. Рассмотрены методы и средства радиоволновой диагностики двигателей летательных аппаратов. Предложен способ полетной вибродиагностики (газотурбинного) авиадвигателя средствами сверхближней радиолокации. Установлена структура электромагнитного поля в секции турбины высокого давления. Определена пространственная зависимость напряженности поля и коэффициента отражения зондирующего сигнала в функции положения, регулярного и вибрационного перемещения, а также поломок лопаток.

Ключевые слова: газотурбинный авиадвигатель, сверхближняя радиолокация, FEKO.

Boloznev Viktor Vasil'evich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of electronic and quantum devices,
Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev
(420084, 10 K. Marks street, Kazan, Russia)

Zastela Mikhail Yur'evich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of electronic and quantum devices,
Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev
(420084, 10 K. Marks street, Kazan, Russia)

Mirsaitov Fanis Nailevich

candidate of technical sciences,
director of department of information technologies,
Open joint-stock company «Tulpar-Tekhnik»
(420306, Republic of Tatarstan, Laishevsky district,
Airport «Kazan-2»)

Abstract. The methods and means of radio-wave diagnostics of aircraft engines. Set forth the structure of the electromagnetic field in the section of the turbine high pressure. Determined the spatial dependence of the field intensity and the reflection coefficient of the probe signal as a function of position, regular and vibratory displacement and breakage of the blades.

Key words: gas turbine aircraft engine, sverhslozhnye radar, FEKO.

УДК 629.7.03:658.583

Болознев, В. В.

Методы и средства радиоволновой вибродиагностики двигателей летательных аппаратов /
В. В. Болознев, М. Ю. Застела, Ф. Н. Мирсаитов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. –
№ 2 (10). – С. 102–108.