

УДК 629.3.062.3

А.В. МАСЛОВСКИЙ, М.Г. БАКУЛИН

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

МИКРОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ. ПРИНЦИПЫ, ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены принципы построения микроволновых систем измерения радиальных зазоров в газотурбинных двигателях и возможности использования микроволновых измерений для решения других практических задач. Описываются основные факторы, влияющие на характеристики микроволновых измерений и преимущества микроволновых систем перед другими системами измерения радиальных зазоров. Приведены результаты измерений с применением микроволновой системы при проведении стендовых испытаний авиационного газотурбинного двигателя. На основе анализа результатов стендовых и лабораторных испытаний определяется основная область применения микроволновых измерительных систем.

Ключевые слова: микроволновый датчик, радиальный зазор, роторные лопатки, турбина высокого давления, компрессор высокого давления.

Введение

В процессе работы роторной машины различные элементы газовоздушного тракта под воздействием температуры в разной степени изменяют свои линейные размеры, что приводит к изменению зазора между роторными лопатками и корпусом газотурбинного двигателя. При маневрировании самолета на элементы двигателя воздействуют различные силы, которые также могут привести к изменению радиальных зазоров. Актуальность проблемы измерения и управления радиальными зазорами подтверждается большим списком работ приведенных в обзоре [1].

Для целей измерения радиальных зазоров наибольшее применение находят бесконтактные методы измерения, использующие разного рода физические явления. Среди них можно выделить: токовых-ревые (вихретоковые), емкостные, оптические и микроволновые. В токовых-ревых датчиках используется явление электромагнитной индукции. Емкостные датчики относятся к датчикам параметрического типа, в которых изменение зазора вызывает изменение емкостного сопротивления датчика. Оптические датчики основаны на измерении величины просвета между торцами лопаток и корпусом на видеоизображении. Микроволновые датчики используют принцип отражения (переизлучения) электромагнитной волны, излучаемой передающей антенной, от торца лопатки в сторону приемной, и измерении фазового набега этой волны.

Все эти бесконтактные методы могут использоваться для измерения радиальных зазоров, и каждый из них имеет свои преимущества и недостатки,

определяющие область их применения. Основным критерием определяющим преимущества того или иного датчика является точность измерений в условиях функционирования ГТД, а они являются весьма тяжелыми, особенно, на турбине высокого давления (температура 1700 °С и выше, давление 20 атм. и выше). В этой ситуации наиболее привлекательными становятся микроволновые датчики и, в связи с этим, в западных странах микроволновый метод измерения радиальных зазоров рассматривается как один из основных при использовании на турбинах высокого давления в условиях воздействия высоких температур [2].

В известных в настоящее время микроволновых системах применяются либо коаксиальные, либо волноводные антенные системы. Коаксиальные антенны имеют ограничение рабочего диапазона сверху и поэтому работают в более низком радиочастотном диапазоне. Это с одной стороны удешевляет производство таких систем, но с другой стороны ухудшает их чувствительность и, следовательно, точность измерения. Недостатком коаксиальных линий является сложность качественной изоляции центрального проводника для условий воздействия высоких температур, сложность отвода тепла от центрального проводника, относительно высокое затухание сигнала на высоких частотах, изменение диэлектрической проницаемости при высоких температурах. Преимуществом коаксиальных систем является возможность их установки в отверстиях диаметром 6...8 мм.

Волноводные антенные системы представляют собой полые металлические трубки прямоугольного

или круглого сечения и поэтому условия их применения ограничиваются только свойствами материала, из которого они изготавливаются. Рабочая температура при этом может достигать 2000 °С. Для обеспечения монтажа волноводной антенной системы в отверстие диаметром 10...16 мм приходится использовать сигналы с более высокой несущей частотой, что обеспечивает более высокую чувствительность к изменениям геометрических параметров проточной части ГТД.

Приведенные ниже результаты экспериментальных измерений получены с использованием волноводных антенных систем.

1. Принцип действия и особенности микроволновой системы измерения зазоров

Микроволновый метод измерения радиальных зазоров (РЗ) представляет собой адаптированный к условиям газотурбинного двигателя фазовый метод измерения расстояний с использованием электромагнитных СВЧ колебаний [3]. Он заключается в том, что расстояние l , пройденное до отражающего объекта, определяют через измерение разности фаз $\Delta\varphi$ излучаемого и принятого сигналов:

$$\Delta\varphi = 4\pi l / \lambda ,$$

где l – измеряемое расстояние; λ – длина волны СВЧ колебания.

Измерение разности фаз осуществляют, как правило, с помощью квадратурного фазового детектора, имеющего периодическую зависимость выходного сигнала от разности фаз сигналов на его входах, например:

$$S_i(t) = A_r(t) \cos(\varphi_r(t) - \varphi_t(t));$$

$$S_q(t) = A_r(t) \sin(\varphi_r(t) - \varphi_t(t)),$$

где $S_i(t), S_q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие сигнала; $A_r(t)$ – текущая амплитуда принимаемого сигнала; $\varphi_r(t), \varphi_t(t)$ – текущие фазы принятого и излученного сигналов.

По отсчетам квадратурных сигналов может быть вычислена текущая разность фаз, которая потом пересчитывается в измеряемое расстояние. Точность измерения фазы в микроволновой системе определяется стабильностью излучаемых колебаний, шумами тракта обработки и теоретически позволяет измерять расстояние с точностью до тысячных долей миллиметра, что подтверждается испытаниями датчика, разработанного ООО «Радарные технологии – 2Т», в лабораторных условиях при проведении метрологической оценки.

Описанные принципы хорошо реализуются и теоретически обосновываются при выполнении ус-

ловия, что объект находится в открытом пространстве в дальней зоне, когда расстояние до него существенно больше длины волны. В этом случае направленные свойства излучаемого и отраженного сигналов могут быть описаны диаграммами направленности, а сами объекты можно описать, как одноточечные источники. В случае измерения расстояния до торца лопатки внутри ГТД, условия дальней зоны не выполняются, и алгоритм измерения, хоть и основан на измерении разности фаз, но приобретает некоторые особенности.

На рис. 1 приведено схематическое изображение процесса облучения элементов ГТД сигналом микроволнового датчика.

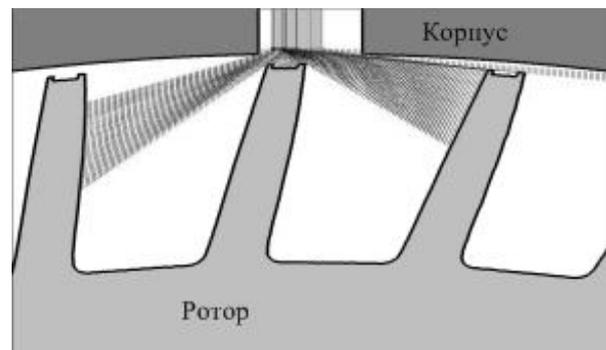


Рис. 1. Облучение элементов проточной части ГТД

Из данного рисунка видно, что облучается не только торец лопатки, но и другие. Поэтому принимаемый сигнал является суперпозицией разных отраженных сигналов. Это влияет на точность измерения и требует использования более сложных алгоритмов обработки.

Практическая точность измерения фазы, реализуемая на работающем ГТД, значительно ниже инструментальной точности, достигаемой в лабораторных условиях. Основными факторами, влияющими на точность измерения радиальных зазоров, являются:

- соотношение размеров роторной лопатки и сечения антенны;
- наличие отражений не только от торца лопатки, но также от различных статичных элементов двигателя и тракта передачи электромагнитных колебаний;
- сложная форма поверхности торцов роторных лопаток;
- наличие осевого смещения ротора двигателя;
- загрязнение поверхности антенны продуктами сгорания;
- нестабильность линий передачи сигналов;
- наличие прямого прохождения сигнала передатчика в приемный тракт;
- воздействие на измерительную аппаратуру высокой температуры, давления и вибрации.

2. Методы борьбы с факторами, влияющими на точность измерений

Рассмотрим более подробно способы уменьшения влияния мешающих факторов на точность измерений в микроволновых системах. Они подразделяются на конструктивные и алгоритмические.

Одним из перечисленных факторов является наличие мешающих отражений. Из рис. 1 видно, что область видимости других элементов минимальна, когда лопатка находится, непосредственно, перед антенной, причем, чем меньше раскрыв антенны, тем меньше область видимости посторонних предметов. Уменьшить раскрыв антенны позволяет применение волноводных датчиков прямоугольного сечения с малым значением меньшей стороны. Фактически этот параметр и будет определять минимальное значение сечения торца лопатки, при котором использование микроволновых систем измерения зазоров является оправданным.

Уменьшить влияние температуры и давления позволяет использование полностью металлической конструкции антенны и построение системы с идентичным опорным каналом [4].

Уменьшение влияния остальных факторов достигается комплексной обработкой сигналов, включающей в себя:

1. Следящий спектральный анализ, позволяющий с высокой точностью измерить любые изменения частоты вращения ротора, осуществить высокоточную 'нарезку' сигнала на лопаточные периоды и определить оптимальные моменты взятия отсчетов.

2. Анализ, основанный на построении и преобразовании фазового портрета сигнала, позволяющий отрезать лопаточного периода сигнала разбить на характерные участки и анализировать их по отдельности. Такая обработка не только снижает влияние смещения сигнала, вызванного отражениями от статических объектов и прямого прохождения сигнала из передатчика в приемник, но и обеспечивает получение дополнительной информации об изменении геометрических размеров объектов (удлинение лопатки, расстояние до ротора и т.п.).

Следует отметить, что фактор влияния отражений от других элементов ГТД является следствием высокой чувствительности микроволновых систем. В некоторых случаях наблюдаются отражения не только от элементов ступени, в которой производятся измерения, но и от элементов соседних ступеней. Так, например, при стендовых измерениях на компрессоре высокого давления ГТД наблюдались сигналы от роторных лопаток соседних ступеней, которые характеризуются наличием специфических спектральных составляющих, которые могут быть выделены при использовании следящего спектраль-

ного анализа. Изменение уровня этих составляющих косвенно характеризует осевое смещение рабочего колеса.

С учетом воздействия перечисленных факторов и методов борьбы с ними была спроектирована и изготовлена микроволновая система для измерения радиальных зазоров турбины высокого давления авиационного двигателя.

3. Результаты натуральных изменений радиальных зазоров

В микроволновой системе измерения радиальных зазоров, разработанной ООО «Радарные технологии» используется волноводная антенная система с рабочей частотой 34,4 ГГц, что позволяет при диаметре отверстия в корпусе ГТД 10...16 мм использовать устойчивую к воздействию высоких температур волноводную многоэлементную антенную систему и применить опорный канал для компенсации воздействия температуры и вибрации.

Данная микроволновая система обеспечивает измерение средних по рабочему колесу радиальных зазоров в диапазоне 0...3 мм с разрешением до 0,01 мм во всем диапазоне частот вращения ротора и индивидуальных зазоров по каждой лопатке с точностью 0,05 мм. Она может использоваться как на турбине, так и на компрессоре, высокого и низкого давления для измерения зазоров для лопаток с толщиной сечения не менее 0,5 мм и длиной лопаток не менее 15 мм.

В качестве примера возможностей аппаратуры приведены результаты измерений радиальных зазоров в турбине высокого давления, выполненные при стендовых испытаниях газогенератора авиационного ГТД. На рис. 2 приведен график частоты вращения при имитации полетного цикла и графики изменения радиальных зазоров по каждой лопатке.

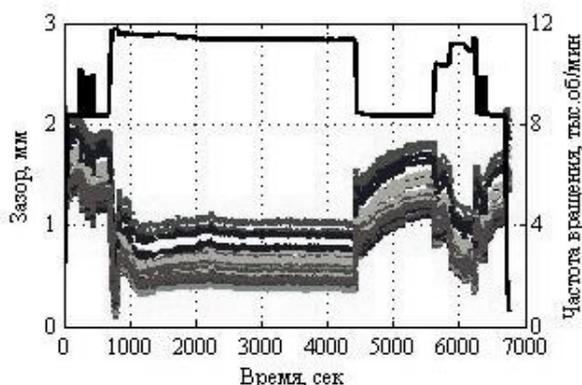


Рис. 2. Радиальные зазоры, измеренные на ТВД при стендовых испытаниях газогенератора ГТД

Три лопатки для точной идентификации были укорочены. Их кривые хорошо выделяются на дан-

ном графике. Из приведенных результатов измерений, видно, что величина зазора изменяется по сложному закону в процессе работы ГТД.

На рис. 3 представлен фрагмент изменения среднего значения зазора по всем лопаткам на фоне кратковременного повышения частоты вращения ротора (имитация руления на взлетно-посадочной полосе). Здесь хорошо видно, что кратковременное увеличение частоты вращения ротора (сплошная линия) вызывает такое же кратковременное уменьшение величины среднего зазора на 0,18 мм (пунктирная линия). Это уменьшение вызвано быстрым прогревом и удлинением пера лопатки. Медленное уменьшение среднего зазора вызвано прогревом ротора в режиме ‘малого газа’.

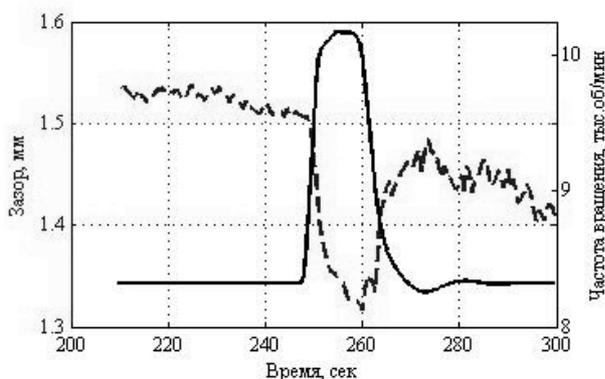


Рис. 3. Изменение среднего значения радиального зазора при кратковременном повышении частоты вращения ротора

Другой пример практического использования микроволновой системы иллюстрирует рис. 4, на котором приведены результаты измерения радиальных зазоров на нескольких запусках при разных режимах: два ‘холодных’ запуска, один ‘горячий’ и один промежуточный вариант, с паузой между остановкой и новым запуском двигателя 2 часа.

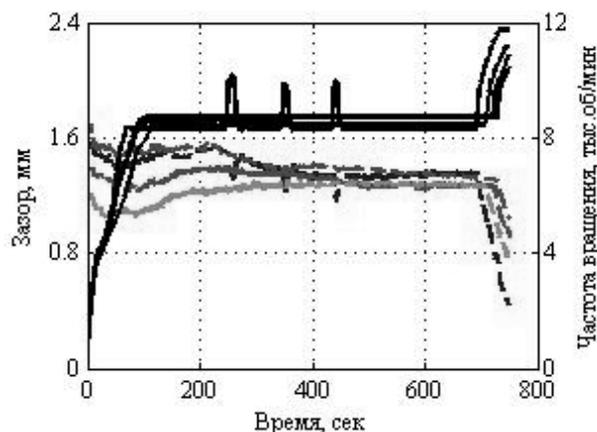


Рис. 4. Средние значения радиальных зазоров и графики частоты вращения для разных условий запуска двигателя

Из приведенных графиков видно, что независимо от условий запуска по истечении 10 минут зазоры стабилизируются и приводятся к одному значению.

Новые возможности микроволновых систем измерения иллюстрируются графиками на рис. 5 и рис. 6, полученные при измерении на КВД при проведении стендовых испытаний газогенератора. На рис. 5 приведены временные зависимости частоты вращения, среднего зазора и удлинения лопатки, полученные при снятии дроссельной характеристики с применением обработки фазового портрета сигнала.



Рис. 5. Результаты стендовых испытаний при измерениях на КВД газогенератора (частота вращения, зазор и удлинение лопатки)

На рис. 6 приведены временные зависимости частоты вращения (сплошная линия) и среднего значения предполагаемого признака (пунктирная линия), характеризующего осевое смещение рабочего колеса, полученные при измерении на КВД во время стендовых испытаний газогенератора. Сплошная серая линия – это мгновенное значение признака.

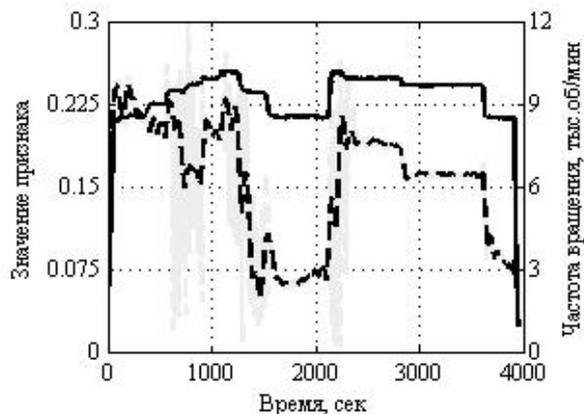


Рис. 6. Зависимости частоты вращения и признака осевого смещения по результатам стендовых испытаний при измерениях на КВД газогенератора

Заключение

Микроволновые системы обеспечивают измерение в реальном масштабе времени радиальных зазоров компрессоров и турбин авиационных двигателей по каждой лопатке во всем диапазоне частот вращения роторов при воздействии высоких температур и вибраций.

Проведенные стендовые измерения продемонстрировали возможность измерения радиальных зазоров при воздействии высоких температур с точностью 0,05 мм и разрешением не хуже 0,01 мм.

Поскольку микроволновые системы обладают гораздо большей дальностью действия по сравнению с емкостными и токовихревыми системами они способны помимо измерения радиальных зазоров обеспечить получение дополнительной информации об изменении линейных размеров элементов проточной части.

Экспериментальные результаты подтверждают возможность применения микроволновых систем для одновременного измерения радиальных зазоров, осевого смещения ротора и удлинения рабочих лопаток.

Литература

1. Боровик С.Ю. Активное регулирование радиальных зазоров в проточной части ГТД (Обзор зарубежных публикаций) / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов, В.П. Данильченко // Газотурбинные технологии. – Февраль-март, 2011. – № 2. – С. 12-19.
2. *More Intelligent Gas Turbine Engines*, RTO technical report TR-AVT-128, published April 2009.
3. *Справочник по радиолокации* / Под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1976. – Т. 1. – 455 с.
4. *Патент России Способ и устройство для измерения зазоров (варианты)* / Масловский А.В. – № 2307999 от 10.10.2007.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук И.В. Егоров, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия.

МІКРОХВИЛЬОВІ ВИМІРЮВАННЯ В ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ. ПРИНЦИПИ, МОЖЛИВОСТІ І ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

О.В. Масловський, М.Г. Бакулін

Розглянуто принципи побудови мікрохвильових систем вимірювання радіальних зазорів в газотурбінних двигунах і можливості використання мікрохвильових вимірювань для вирішення інших практичних завдань. Описуються основні фактори, що впливають на характеристики мікрохвильових вимірювань і переваги мікрохвильових систем перед іншими системами вимірювання радіальних зазорів. Наведено результати вимірювань із застосуванням мікрохвильової системи при проведенні стендових випробувань авіаційного газотурбінного двигуна. На основі аналізу результатів стендових і лабораторних випробувань визначається основна область застосування мікрохвильових вимірювальних систем.

Ключові слова: мікрохвильовий датчик, радіальний зазор, роторні лопатки, турбіна високого тиску.

MICROWAVE MEASUREMENTS IN GAS TURBINE ENGINES. PRINCIPLES, POSSIBILITY AND SCOPE

A. V. Maslovskiy, M. G. Bakulin

The principles of construction of the microwave system for measuring the radial clearances in gas turbine engines and the possibility of using microwave measurements to solve other problems practically. Describes the main factors influencing the characteristics of microwave measurements and the advantages of microwave systems to other systems of measurement of the radial clearance. The results of measurements using a microwave system for bench testing of aircraft turbine engine. Based on the analysis of the results of bench and laboratory tests determined the main area of application of microwave measurement systems.

Key words: microwave sensor, tip clearance, rotor blades, high pressure turbine.

Масловский Александр Владимирович – канд. техн. наук, Генеральный директор, ООО «Радарные технологии -2Т», Москва, РФ, e-mail: maslovskiy@2tgroup.com.

Бакулін Михаил Германович – канд. техн. наук, начальник отдела информационных технологий, ООО «Радарные технологии -2Т», Москва, РФ, e-mail: bakulin@infoset.ru.