

УДК 629.3.062.3

А.В. МАСЛОВСКИЙ

ООО «Радарные технологии – 2Т», Россия

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ

Рассмотрены основные факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики микроволновых систем измерения радиальных зазоров. Показана возможность построения микроволновых систем для работы на турбинах высокого давления с использованием дополнительного опорного канала, обеспечивающего снижение влияния высокой температуры и вибрации на результаты измерений. Приведены результаты измерения радиальных зазоров с применением микроволновой системы при проведении стендовых испытаний авиационного газотурбинного двигателя.

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

Введение

На протяжении последнего десятилетия многие зарубежные компании пристальное внимание уделяют теоретическому исследованию и практическому внедрению методов микроволнового контроля элементов роторных машин и, в частности, микроволновых систем измерения радиальных зазоров [1, 2]. Интерес к этим системам обусловлен, в первую очередь, возможностью проведения измерений при очень высоких температурах, что позволяет использовать эти системы на перспективных ГТД. Микроволновые системы измерения радиальных зазоров (МСИРЗ) позволяют получить информацию о действительной величине радиальных зазоров в реальном масштабе времени. Эта информация, потенциально, может быть использована в работе систем активного управления радиальными зазорами, обеспечивающих существенное увеличение к.п.д. двигателя и экономию топлива.

Наилучшие эксплуатационные характеристики МСИРЗ могут быть получены при условии оптимизации схемы измерения, структуры микроволнового модуля, конструкции антенных систем и линий связи применительно к конкретному типу ГТД с учетом факторов влияющих на работу системы.

Поскольку указанные факторы недостаточно освещены в литературе, актуальным является анализ этих факторов, а также демонстрация возможностей оптимизированной с их учетом МСИРЗ.

1. Принцип действия 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 $\Delta\phi$ излучаемого и принятого сигналов:

$$\Delta\phi = 4\pi l/\lambda, \quad (1)$$

где l – измеряемое расстояние;

λ – длина волны СВЧ колебания.

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

$$U_{\text{вых}} = U_0 \cdot \sin\Delta\phi, \quad (2)$$

где $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение фазового детектора;

U_0 – амплитуда напряжения фазового детектора.

В соответствии с (2) полная разность фаз определяется, как

$$\Delta\phi = \phi_1 + 2\pi n, \quad (3)$$

где $\phi_1 = \arcsin(U_{\text{вых}}/U_0)$ – значение разности фаз, лежащее в диапазоне $0 < \phi_1 < 2\pi$;

$n = 0, 1, 2, \dots$ – целое число.

С учетом (1) и (3) выражение для определения радиальных зазоров с использованием непрерывных СВЧ сигналов может быть записано в следующем виде

$$l = \lambda(\phi_1 + 2\pi n)/4\pi. \quad (4)$$

Поскольку в большинстве случаев величина радиального зазора не превышает 2...10 мм, она может быть однозначно определена с использованием электромагнитных колебаний частотой 7... 38 ГГц (длина волны 8...40 мм).

Основное преимущество микроволнового измерения радиальных зазоров состоит в том, что в точке измерения радиальных зазоров над верхними кромками роторных лопаток устанавливается только

приемно-излучающая антенна. Радиоэлектронная аппаратура, обеспечивающая формирование зондирующих сигналов, прием отраженных сигналов и их обработку (активный микроволновый блок) размещается в "комфортных" условиях на удалении от "горячей" точки. Передача зондирующих сигналов от микроволнового блока к антенне и отраженного сигнала от антенны к микроволновому блоку может осуществляться с использованием коаксиальной или волноводной линии передачи сигналов значительной длины.

Особенность измерения радиальных зазоров роторных машин состоит в том, что требуется выполнение измерений, желательно по каждой лопатке рабочего колеса, в широком температурном диапазоне ($-60 \dots +1600$ °С) при воздействии на измерительное оборудование вибрации (до $10 \dots 60$ г) сложной спектральной структуры.

Точность измерения фазы в микроволновой системе определяется стабильностью излучаемых колебаний, шумами тракта обработки и теоретически позволяет измерять расстояние с точностью до тысячных долей микрона.

2. Факторы, влияющие на точность измерения

Практическая точность измерения фазы реализуемая на работающем ГТД значительно ниже. Она ограничена воздействием на систему дестабилизирующих факторов и некоторыми особенностями распространения, отражения и интерференции электромагнитных колебаний. 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;
- наличие доплеровского сдвига при проведении измерений на работающем двигателе;
- загрязнение поверхности антенны продуктами сгорания;
- нестабильность линий передачи сигналов;
- воздействие на измерительную аппаратуру высоких температур и вибраций.

Сечение антенны в общем случае определяется используемой длиной волны.

Как следует из (4) для расширения диапазона однозначного измерения радиальных зазоров необ-

ходимо увеличивать длину волны СВЧ сигнала. С другой стороны, при чрезмерном увеличении длины волны уменьшается уровень сигнала, отражаемого от торца роторной лопатки имеющей конечную ширину, возрастают геометрические размеры антенн и волноводных линий передачи сигналов.

Рис. 1 иллюстрирует облучение роторной лопатки.

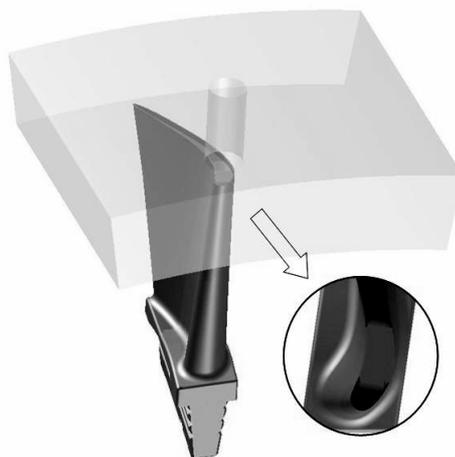


Рис. 1. Облучение роторной лопатки

Как видно из приведенного рисунка, антенна формирует на поверхности лопатки пятно, размеры которого зависят от сечения антенны и формы ее диаграммы направленности. Кроме торца лопатки облучается также ее основание и соседние лопатки. Соотношение энергии сигналов получаемых от торца лопатки и от других элементов снижается при увеличении размеров пятна.

При работе двигателя это соотношение изменяется, поскольку происходит изменение длины лопаток и радиального зазора.

Сигнал, получаемый микроволновой системой можно представить в виде суммы двух сигналов, один из которых обусловлен отражениями от торца роторной лопатки, а второй отражениями от статических облучаемых элементов и неоднородностей линий связи.

С учетом наличия зависимости уровня отраженного сигнала от расстояния до лопатки, полный сигнал может быть описан следующим выражением

$$S = \frac{A_0}{B_0 + Z^x} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{h^2 + 4Z^2} + j\pi} + ae^{j\varphi}, \quad (5)$$

где Z – величина зазора в мм (от 0,1 до 30); h – расстояние между антеннами (6 мм); λ – длина волны в мм; a , φ – амплитуда и фаза статического сигнала; A_0 , B_0 , x – параметры модели.

На рис. 2 приведены фазы сигналов полученных с использованием данного выражения и экспериментально при изменении радиального зазора в широких пределах на испытательном стенде.

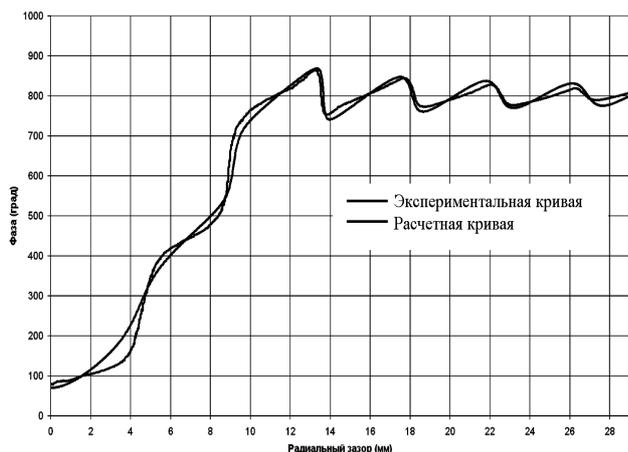


Рис. 2. Фаза при изменении радиального зазора

Видно, что расчетные и экспериментальные характеристики в значительной мере совпадают. Наибольшее отличие экспериментальной и теоретической кривой наблюдается при малых значениях радиальных зазоров, поскольку используемая простейшая модель не учитывают все особенности формирования отраженного сигнала. Приведенные зависимости показывают, что при проведении измерений на реальном газотурбинном двигателе модуляционная характеристика (зависимость фазы сигнала от радиального зазора) является нелинейной. Это обстоятельство требует принятия специальных мер для снижения ошибок вызванных нелинейностью и, в частности, уменьшения размеров пятна формируемого за пределами торца лопатки. Положение пятна на торце лопатки также сказывается на результатах изменения фазы.

Дополнительную ошибку при определении фазы вызывает эффект Доплера, обусловленный отражением от движущихся элементов конструкции, который приводит к возникновению дополнительных составляющих на частотах $F = 2V_r/\lambda$, где V_r — радиальная составляющая перемещения отражающих объектов. Существуют различные способы минимизации влияния эффекта Доплера на результаты измерения фазы

Следует также учитывать последствия загрязнения антенны продуктами сгорания топлива и масла. Загрязнение приводит к изменению параметров антенн и, следовательно, к возникновению ошибки измерения радиальных зазоров. Меры по недопущению или существенному снижению загрязнения должны разрабатываться при адаптации микроволновой системы для конкретного типа двигателя.

Антенная система микроволнового измерителя радиальных зазоров должна монтироваться либо в имеющемся отверстии, используемом обычно для других целей, либо в специально выполняемом в корпусе двигателя отверстии минимального диаметра. Антенна и линия передачи сигналов могут быть волноводного или коаксиального типов.

Основным преимуществом коаксиальных линий связи является возможность передачи сигналов с длиной волны от $\lambda > 1,57 \cdot (D + d)$, где D и d — диаметры внешнего и внутреннего проводников соответственно, до $\lambda \rightarrow \infty$, а также относительная простота прокладки коаксиального кабеля по трассе сложной формы. 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.

Преимуществами волноводных линий передачи сигналов (полых трубок прямоугольного или круглого сечения) являются простота их охлаждения, относительно низкое затухание на высоких частотах, стабильность и одномодовость при передаче сигнала, а также возможность использования антенны в виде открытого конца волновода. К недостаткам следует отнести сложность изгиба волноводов и невозможность распространения по ним сигналов с $\lambda > 3,2R$, где R — диаметр круглого волновода.

При эксплуатации системы измерения радиальных зазоров линия передачи, которая в общем случае может содержать различные изгибы и вспомогательные элементы, подвергается воздействию температур и вибраций, что приводит к изменению ее длины и формы.

Так, например, при нагревании волновода из молибденового (температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 6 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$), титанового ($\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$) или медного ($\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$) сплава длиной 500 мм на 300 °С абсолютное изменение его длины составит соответственно 0,9 мм, 1,35 мм и 2,7 мм соответственно. Если требуется обеспечить точность измерения 0,01 мм, то это может быть обеспечено в существующих фазовых системах, например, при длине волноводной линии не более 35 мм и изменении температуры волновода не более чем на 30 °С, что практически не может быть выполнено при проведении измерений на функционирующей роторной машине.

Поскольку фазовые системы обеспечивают относительные измерения, необходимо перед началом эксплуатации производить их калибровку, которая заключается в том, что полученному на конкретном рабочем колесе конкретного двигателя значению фазового сдвига ставится в соответствие действительная величина радиального зазора измеренная, например, механическим способом в месте установки антенны. Для осуществления калибровки радиолокационная система должна обеспечивать проведение измерений в статических условиях.

С учетом воздействия перечисленных факторов

была спроектирована микроволновая система для измерения радиальных зазоров турбины высокого давления авиационного двигателя. Система содержит непосредственно измерительный канал и опорный канал, конструктивно идентичный измерительному, который обеспечивающий компенсацию воздействия температуры и вибрации.

3. Результаты натурных изменений радиальных зазоров

При проведении измерений использовалась микроволновая система, обеспечивающая измерение радиальных зазоров каждой роторной лопатки турбины высокого давления во всем диапазоне частот вращения ротора в реальном масштабе времени с точностью 0,05 мм при проведении стендовых испытаний авиационного газотурбинного двигателя. Измерительная система является полностью автономной и не связана с какими либо двигательными или стендовыми измерителями. Помимо радиальных зазоров система определяет частоту вращения ротора, которая используется при интерпретации результатов измерений и их сопоставлении с другими измерениями, которые могут выполняться при испытаниях двигателя. Система обеспечивает проведение измерений при установке антенной системы в имеющихся в корпусе двигателя отверстиях и не требует его доработки.

В качестве примера возможностей аппаратуры на рис. 3 приведены результаты измерений радиальных зазоров каждой небандажированной лопатки турбины высокого давления, выполненные при стендовых испытаниях газогенератора авиационного ГТД.

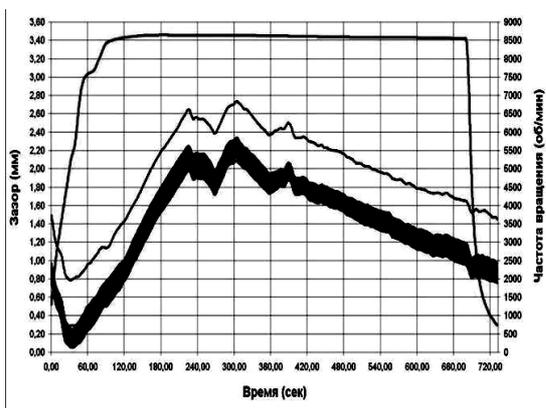


Рис. 3. Радиальные зазоры, измеренные при стендовых испытаниях газогенератора

Из приведенных результатов измерений (одна из турбинных лопаток укорочена относительно других), видно, что величина зазора изменяется по сложному закону в процессе работы ГТД.

На рис. 4 представлены радиальные зазоры ка-

ждой роторной лопатки ТВД (три лопатки укорочены на 0,4 мм), полученные непосредственно при запуске газогенератора (кружки), в процессе прогрева двигателя (треугольники) и при его работе на номинальном режиме (квадраты), в процессе проведения других испытаний.

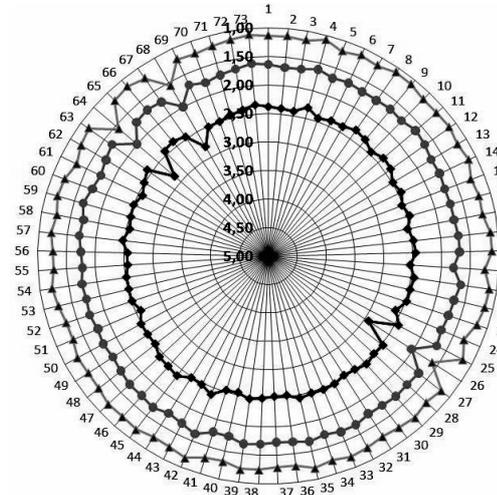


Рис. 4. Радиальные зазоры каждой роторной лопатки ТВД в различные моменты времени

Высокая разрешающая способность МСИРЗ не только позволяет исследовать характер изменения радиальных зазоров в процессе работы ГТД, но и оценивать его некоторые конструктивные особенности. На рис. 5 представлены графики изменения среднего по турбинному колесу радиального зазора и частоты вращения ротора при «холодной» раскрутке ротора стартером.

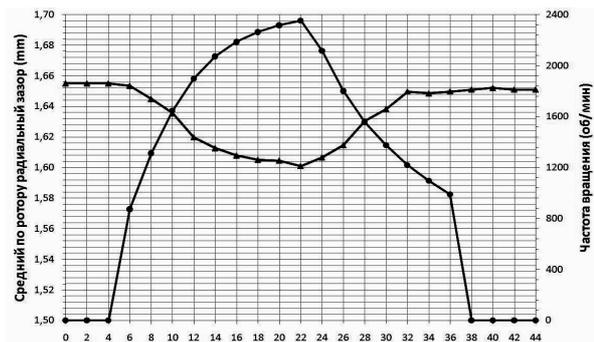


Рис. 5. Изменение радиальных зазоров при «холодной» раскрутке ротора

Видно, что увеличение частоты вращения ротора выше определенного значения вызывает уменьшение величины радиальных зазоров (максимальное изменение — 0,05 мм). Последующий сброс оборотов приводит к восстановлению начальной величины радиальных зазоров. Возможно, такое поведение зазоров обусловлено изменением посадки лопаток в замках под действием центробежных сил.

Другой пример возможностей МСИРЗ иллюст-

рирует рис. 6, на котором приведены с высоким разрешением результаты измерения радиальных зазоров по всем рабочим лопаткам турбины высокого давления в некоторые моменты времени при снятии дроссельной характеристики.

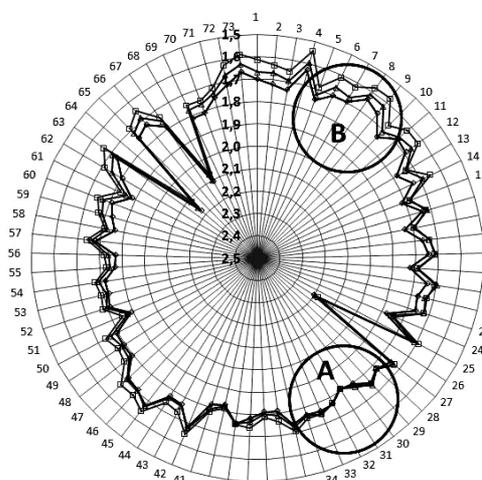


Рис. 6. Радиальные зазоры всех лопаток

Анализ показывает, что форма рабочего колеса отличается от окружности и может быть аппроксимирована эллипсом, разность длин большой и малой осей которого достигает 0,15 мм.

Кроме того, при небольших изменениях частоты вращения ротора радиальный зазор части роторных лопаток (область А) практически не изменяется, в то время как РЗ другой части роторных лопаток

(область В) изменяется на 0,09 мм. Это может объясняться особенностями реализации системы охлаждения диска и лопаток.

Заключение

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

Наибольшее влияние на точность измерения радиальных зазоров оказывают изменения линейных размеров антенной системы и линии передачи сигналов при колебаниях температуры. П

роведенные стендовые измерения продемонстрировали возможность измерения радиальных зазоров турбин высокого давления при воздействии высоких температур с точностью 0,05 мм и разрешением не хуже 0,01 мм

Литература

1. Geisheimer Jonathan L. *A Microwave Blade Tip Clearance Sensor for Active Clearance Control Applications* / Jonathan L. Geisheimer, Scott A Billington, David W. Burgess. – AIAA–2004–3720, 2004.
 2. *Engine-mounted radar to detect FOD ingestion* // *Flight International*, 09.08.2005.
 3. *Справочник по радиолокации* / Под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1976. – Т. 1. – 455 с.
- Поступила в редакцию 25.05.2009

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

ПРИНЦИПИ ПОБУДУВАННЯ ТА ПРАКТИКА ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ СИСТЕМ ВІМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНИХ ЗАЗОРІВ

О.В. Масловський

Розглянуто основні фактори, що впливають на експлуатаційні характеристики мікрохвильових систем вимірювання радіальних зазорів. Показана можливість побудови мікрохвильових систем для роботи на турбінах високого тиску з використання додаткового опорного каналу, що забезпечує зниження впливу високої температури та вібрації на результати вимірювань. Приведено результати вимірювання радіальних зазорів з використанням мікрохвильової системи при проведенні стендових випробувань авіаційного газотурбінного двигуна.

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

THE PRINCIPLES OF THE BUILDING AND PRACTICE USE OF MICROWAVE SYSTEMS FOR TIP CLEARANCE MEASUREMENTS

A. V. Maslovskiy

Main factors influencing field-performance data in microwave systems for the measurement of tip clearances are considered. Possibility of the building microwave systems is shown for the operating high pressure turbine by the use the additional supporting channel, so providing reduction of the influence of the high temperature and vibrations on measurement results. The results of the tip clearance microwave measurements for the aircraft engine on the test rig are provided.

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

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