

УДК 629.735.03-226.2

А.А. Иноземцев, С.В. Бажин, М.А. Снитко

ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ ТВД АВИАЦИОННОГО ГТД

Сформулирована задача оптимизации величины радиального зазора. Выполнен обзор основных методов измерения радиального зазора над торцами рабочих лопаток газотурбинного двигателя. Рассмотрены их достоинства и недостатки. Описана методика проверки корректности результатов измерения радиального зазора при испытаниях газотурбинного двигателя. Показано, что результаты, полученные с применением емкостной и микроволновой систем измерения в достаточной степени (0,08 мм) соотносятся с результатами расчетов. Описан общий подход к построению и настройке расчетных моделей радиального зазора.

Ключевые слова: радиальный зазор, турбина высокого давления, рабочая лопатка, система измерения радиального зазора, авиационный газотурбинный двигатель.

Введение

Ведущие производители газотурбинных двигателей (ГТД) уделяют внимание разработке решений по изучению, измерению и контролю радиальных зазоров (РЗ) между торцами рабочих лопаток (РЛ) и корпусными деталями в турбине и компрессоре. Это связано с влиянием, которое оказывает величина РЗ на основные параметры ГТД, такие как экономичность и ресурс. Увеличение относительного РЗ на 1% приводит к снижению КПД двигателя примерно на 3% и перерасходу топлива почти на 10%. Как известно характер изменения РЗ зависит от комплексных параметров: режим работы двигателя; режим работы системы обдува корпусов (системы автоматического управления радиальных зазоров (САУРЗ)); организация систем охлаждения ротора и статора [1]. В связи с этим стоит задача оптимизации величины РЗ во всем диапазоне режимов работы двигателя — обеспечение минимальной величины зазоров (0.4...0.6 мм) на наиболее продолжительном режиме работы двигателя (крейсерский режим) и предотвращения чрезмерной приработки лопаток на начальных этапах (режимы запуска и прогрева двигателя). Для ее решения необходимо установить зависимость между параметрами работы двигателя и характером изменения величины РЗ. Математические модели, построенные для анализа величины РЗ, не дают однозначного решения и требуют верификации по результатам измерения. Именно поэтому важное место в вопросе оптимизации занимают измерения РЗ на двигателе.

Методы измерения РЗ

Существует несколько способов измерения радиальных зазоров, основными на сегодня являются: механический, микроволновой, емкостной,

оптический, лазерный, токовихревой. Область применения любого датчика определяется теми или иными преимуществами метода, на основе которого он разработан и условиями эксплуатации. В турбине высокого давления (ТВД) авиационного ГТД условия эксплуатации наиболее жесткие:

- высокая температура (1800 – 2000 °С);
- высокое давление (20 – 30 атм.);
- вибрации (10...60 g);
- продукты сгорания.

Механический метод измерения

Механический метод измерения заключается в прямом измерении величины РЗ на холодном и работающем двигателе. На холодном двигателе механически измеряется величина монтажного зазора с помощью шупов различной величины. На работающем двигателе с помощью истираемых проставок, устанавливаемых в стыки деталей проточной части, измеряется минимальная в процессе работы двигателя величина РЗ. Механический метод измерения в силу своей простоты и высокой точности применяется при сборке практически любого ГТД.

Оптический метод измерения

Широкое распространение оптические методы при измерении РЗ получили благодаря очень высокой точности измерения. Их реализуют на основе волоконно-оптических и лазерных интерферометров.

Известно, что в волоконно-оптическом интерферометре Фабри-Перо интерференция происходит на частично отражающем сколе волокна и внешнем отражателе (торце лопатки). Размер ЧЭ датчика перемещений, основанного на этом принципе, сопоставим с диаметром счетовода, около

0,1 мм, а его чувствительность может достигать долей ангстрема. При этом сам ЧЭ помехоустойчив к внешним электромагнитным наводкам. Структурная схема волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо изображена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо

Излучение лазерного диода вводится в волоконный световод и через ответвитель передается на волокно. При этом часть излучения отражается от торца волоконного световода, а другая его часть высвечивается в воздух, отражается от торца пера лопатки и возвращается обратно в волоконный световод. Луч, отраженный от торца волоконного световода, интерферирует с лучом, отраженным от торца пера лопатки и на фотоприемнике регенерируется интенсивность излучения, изменяющаяся периодически в зависимости от расстояния между торцом световода и торцом пера лопатки.

Интенсивность излучения I на фотоприемнике может быть вычислена по формуле:

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} x_0 + \phi_0 \right) \right), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность излучения лазерного диода, Вт/м²; λ – длина волны излучения лазерного диода, мкм; x_0 – радиальный зазор, мкм; ϕ_0 – начальная фаза волны излучения лазерного диода, рад.

Никакой реальный источник оптического излучения не является идеально монохроматическим, а, следовательно, он имеет ограниченную длину когерентности. В излучении лазерного диода обычно присутствуют несколько мод, а суммарная ширина спектральной линии равна примерно 3...5 нм. Длина когерентности l_c связана с шириной спектра $\Delta\lambda$ следующим образом

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

Луч, отраженный от торца волоконного световода и луч, отраженный от торца пера лопатки, имеют разные фазы. Оценить разность фаз этих световых лучей можно с помощью коэффициента фазы ξ по формуле:

$$\xi = \pi \frac{1}{l_c}, \quad (3)$$

Формула (1) описывает полную интерференцию двух лучей одинаковой интенсивности. В общем случае их интенсивности могут существенно различаться. В волоконно-оптическом интерферометре луч, отраженный от торца световода оказывается на порядок более слабым, чем луч, отраженный от торца пера лопатки и попавший назад в волокно. В общем случае процент излучения от лопатки и возвращенного в волокно зависит от РЗ. Это связано с тем, что свет, исходящий из волокна, расходится под некоторым углом и лишь часть его, отраженная от лопатки, попадает обратно в волокно и участвует в интерференции. Кроме того, часть излучения поглощается поверхностью пера лопатки и не отражается. Следовательно, использование данного метода при измерении РЗ сопряжено с калибровкой на экспериментальной установке.

Опытным путем установлено, что точность данного метода достаточно высока при измерении РЗ до 1.5 мм. С увеличением РЗ для поддержания высокой точности требуется высокая мощность светового потока, а это ограничивается пропускной способностью оптоволоконного световода. Данное обстоятельство не позволяет применять методы на основе волоконно-оптических интерферометров при измерении РЗ последних ступеней компрессора ГТД, что является недостатком метода. К достоинствам метода, наряду с высокой точностью, можно отнести стойкость к электромагнитным излучениям.

Оптические методы измерения на основе лазерных интерферометров, также как и описанный выше метод, относятся к гетеродинному классу [2]. Отличие заключается в том, что в лазерных интерферометрах принимаемый оптический сигнал может смешиваться с сигналом местного генератора (гетеродина), отличающегося по частоте. Это позволяет достичь большей точности измерения. Структурная схема лазерного интерферометра приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема лазерного интерферометра

Рассматривая принципы и методы измерения, излучения лазера будем считать идеальной плоской волной. Интерферометр, состоящий из светоделителя, опорного или отражателя и измерительного отражателя (торца пера лопатки), настроен на бесконечно широкую полосу пропускания. Интенсивность интерференционного сигнала I на фотоприемнике изменяется по закону

$$I = I_0 + I \cos\left(\frac{4\pi x_0}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где I_0 - постоянная составляющая интерференционного сигнала на фотоприемнике, Вт/м²; I - переменная составляющая интерференционного сигнала на фотоприемнике, Вт/м².

Как и в случае волоконно-оптического метода необходима калибровка. При увеличении РЗ мощность светового потока I , подводимая к фотоприемнику, уменьшается и наоборот. Выполнив калибровку можно построить полиномиальную зависимость выходного сигнала от величины РЗ.

Данный метод, по сравнению с методом на основе волоконно-оптических интерферометров, обладает большой чувствительностью из-за высокой монохроматичности светового излучения лазера. Кроме того, применение оптической системы позволяет использовать мощность светового потока, необходимую для измерения всего диапазона РЗ. К недостаткам метода можно отнести чувствительность к световым и электромагнитным наводкам из-за отсутствия оптического волокна и наличия массивного оптического аппарата. Наличие оптического аппарата также затрудняет препарирование ГТД лазерным интерферометром.

К общим достоинствам рассмотренных оптических методов измерения РЗ также относятся бесконтактность, дистанционность и возможность производить измерения как в статическом, так и в динамическом режимах.

Емкостной метод измерения

Емкостные методы измерения РЗ основаны на применении емкостных датчиков, емкость которых измеряется в зависимости от изменения РЗ. В качестве емкостного датчика широко используют плоский конденсатор, емкость которого может быть вычислена по формуле:

$$C = \frac{E_0 E S}{x_0}, \quad (5)$$

где E_0 - диэлектрическая постоянная воздуха, $E_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; E - относительная диэлектрическая проницаемость среды; S - площадь обкладки конденсатора, м².

Измеряемая величина РЗ x_0 связана с емкостью датчика C обратной зависимостью. Структурная схема измерительной системы изображена на рис. 3.

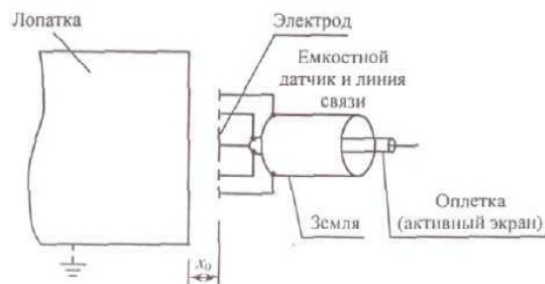


Рис. 3 Структурная схема емкостной измерительной системы

Не вдаваясь в подробности, отметим, что существуют три основные схемы подключения емкостных датчиков к нормализатору сигнала: коаксиальная, псевдотриаксиальная, триаксиальная. На рис. 3 изображена триаксиальная схема, широко распространенная и обладающая наилучшими показателями качества.

В настоящее время установлено, что емкостные методы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими методами:

- малое потребление энергии;
- простота изготовления емкостных датчиков;
- бесконтактность методов;
- высокая точность и чувствительность измерений;
- возможность измерения РЗ от десятых единиц до нескольких микрон.

К недостаткам емкостных методов следует отнести высокие требования к сопротивлению крепежных изолирующих деталей датчиков и необходимости работы на повышенной частоте.

Микроволновый метод измерения

Микроволновый метод измерения РЗ представляет собой адаптированный к условиям ГТД радиолокационный 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:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi l}{\lambda} = \phi + 2\pi n, \quad (6)$$

где l - измеряемое расстояние; λ - длина волны СВЧ колебания; $\phi = \left[\frac{4\pi l}{\lambda} \right]_{\text{mod } 2\pi}$ - разность

фаз, приведенная по модулю 2π , измеряемая фазовым детектором.

С учетом выражения (6) расстояние от источника излучения до отражающей поверхности будет определяться линейным выражением:

$$l = \phi \frac{\lambda}{4\pi} + \frac{\lambda n}{2}, \quad (7)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ - целое число, задаваемое исходя из априорной информации о диапазоне значений зазора или определяемое в процессе калибровки.

Основное преимущество микроволнового измерения состоит в том, что в точке измерения - над торцами РЛ устанавливается только приемно-излучающая антенна. Радиоэлектронная аппаратура, обеспечивающая формирование зондирующих сигналов, прием отраженных сигналов и их обработку (активный микроволновый модуль) размещается в «комфортных» условиях на удалении от «горячей» точки. Передача зондирующих сигналов от микроволнового модуля к антенне и отраженного сигнала от антенны к микроволновому модулю может осуществляться с использованием коаксиальной или волноводной линии передачи сигналов значительной длины.

На первом этапе, на калибровочном стенде определяется коэффициент пропорциональности $\Delta l / \Delta \varphi$ для заданного диапазона измерений РЗ (для зазора до 6 мм - 0,0121 мм/градус). На втором этапе производится калибровка системы на двигателе, обеспечивающая измерение радиального зазора с учетом погрешности установки антенной системы (торец антенной системы может быть заглублен в корпус турбины на 0,5...2,5 мм). Калибровка заключается в сопоставлении результатов механических измерений по каждой лопатке с результатами микроволновых измерений, выполненных при прокрутке ротора вручную или стартером и определения значения фазы соответствующей нулевому радиальному зазору.

Применение оптических систем измерения РЗ в ТВД потребует дополнительных конструктивных решений для организации защиты волноводов от продуктов сгорания. Аналогичные решения применены для измерения температуры рабочих лопаток оптическими пирометрами, где организована воздушная защита холодным воздухом (800 - 900 °С). Однако при измерении в нескольких точках подобная завеса изменит тепловое состояние статора, а следовательно и значение РЗ. Из других систем измерения наиболее распространены емкостные: FOGALE-nanotech - Франция; Tuso - Англия; Thermasoax - Франция; Sarable - Англия и микроволновые системы: Meggit - Англия; Радарные технологии - 2Т, Россия. Системы разработки этих компаний широко применяются для измерения РЗ в ком-

прессорах различных ГТД. Однако вопрос измерения РЗ в ТВД сегодня остается открытым. В связи с чем важно не только провести измерение, но и идентифицировать результаты измерения.

На данный момент в ОАО «Авиадвигатель» отработана методика и успешно проведены измерения РЗ ТВД авиационных ГТД с использованием емкостной (FOGALE-nanotech) и микроволновой (ООО «Радарные технологии -2Т») систем измерения. Результаты измерения после построения и настройке расчетных моделей будут использованы для выполнения оптимизации РЗ.

Оценка корректности измерений

При проведении измерения РЗ в процессе испытаний часто возникает необходимость оценки корректности измерений, связанная с возможной нештатной работой датчика и неоднозначностью влияющих факторов (высокой температуры, продуктов сгорания). Для чего, например, в ОАО «Авиадвигатель» кроме калибровки датчиков при холодных прокрутках ротора, о которых упоминалось ранее, проводился анализ достоверности данных, полученных при измерении РЗ: над рабочими лопатками 1 и 2 ступеней ТВД газогенератора ПД-14 емкостной системой; и рабочей лопаткой 1 ступени ТВД авиационного ГТД ПС-90А2 микроволновой системой. В ходе испытаний моделировалось воздействие одного из влияющих факторов, а результаты измерения сравнивались с расчетными. Во время снятия одной из дроссельных характеристик на прогретой машине в коллекторы обдува система автоматического управления радиальным зазором (САУРЗ) был подан холодный стендовый воздух ($t_{\text{возд}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) в количестве 1% от расхода через компрессор. Измеренная величина изменения среднего радиального зазора сравнивалась с расчетной величиной радиального перемещения корпуса ТВД, определенной по измеренной температуре корпуса. В силу того, что обороты ротора турбины при включении обдува корпуса поддерживались постоянными, то эти величины должны быть достаточно близки. Сравнение измеренных и полученных по упрощенной расчетной модели результатов в процессе испытаний показало их практически полное совпадение (рис. 4), для обеих систем.

Используя аналогичный подход, необходимо проверить индивидуальное влияние основных влияющих факторов: изменение температуры только лопатки, резкое изменение частоты вращения, изменение температуры ротора, изменение режимов работы САУРЗ. Зная влияние каждого из факторов на изменение РЗ, можно с большей точностью проводить анализ данных при

проведении натурных испытаний. Следующим этапом в решении задачи оптимизации является

создание и верификация расчетных моделей, требующихся для определения РЗ.

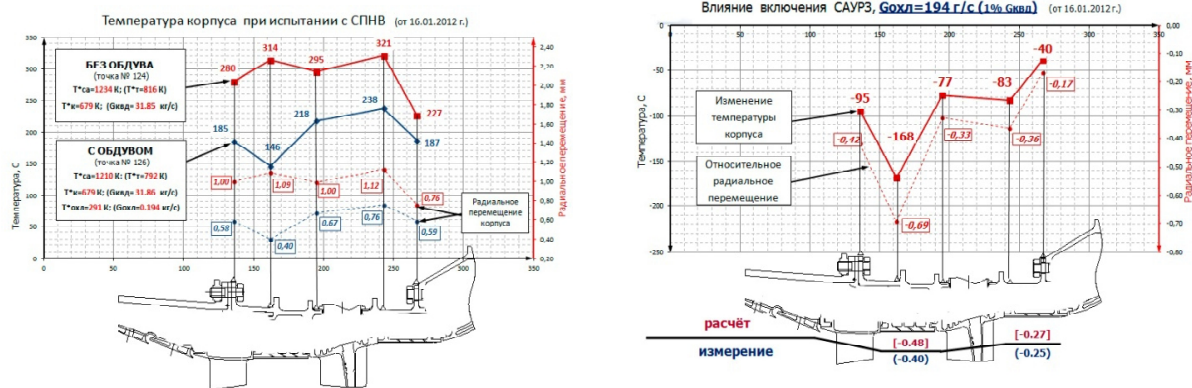


Рис. 4. Сравнение результатов: измеренных и полученных по упрощенной расчетной модели

Моделирование радиальных зазоров

Ключевым моментом при расчетном моделировании изменения радиальных зазоров в турбине является точное определение ее теплового состояния в нестационарной постановке. Полученные на основании информации о тепловом состоянии результаты расчета НДС используются для определения взаимных относительных перемещений деталей ротора и статора турбины и анализа изменения осевых и радиальных зазоров при моделировании работы двигателя.

Основной проблемой выполнения подобных расчетов является верификация расчетных моделей теплового состояния, обусловленная как техническими трудностями (требуется достаточно большой объем термометрирования роторных деталей при ограниченном числе каналов), так и экономическими (высокая цена испытания). Испытания по измерению радиального зазора по РЛ ТВД необходимо выполнять с подробным термометрированием ротора и статора турбины (на испытаниях в ОАО «Авиадвигатель» более 60 замеров температуры на роторе и более 80 на статоре). Такой подход позволяет достаточно точно и быстро настроить модели теплового состояния ротора и статора, особенно в части согласования темпов их прогрева при различных переходных режимах.

Для анализа нестационарного теплового состояния в осесимметричной постановке расчетные модели и методики должны быть верифицированы по результатам испытаний. В ОАО «Авиадвигатель» используются методики, верифицированные при сертификации двигателя ПС-90А2.

Таким образом, может быть установлены максимальные и минимальные зазоры, момент «притирки» (касание лопаток о статор на начальном

этапе работы), а так же общий характер изменения зазора в процессе работы двигателя. В дальнейшем эта информация должна быть использованная для оптимизации конструкции и настройки режимов работы САУРЗ.

Заключение

Рассмотрены бесконтактные методы измерения РЗ в газотурбинных двигателях. Для измерений РЗ над торцами РЛ ТВД выбраны два метода: емкостной и микроволновый. Оба метода позволяют проводить измерения при повышенных температурах, давлениях и наличии продуктов сгорания. Описана методика оценки корректности измерений, благодаря которой имеется возможность использовать результаты натурных испытаний на газогенераторе ПД-14 и двигателе ПС-90А2. Однако для дальнейшей оптимизации РЗ должна быть проведена настройка моделей нестационарного теплового состояния ротора и статора ТВД, так же необходимо дорабатывать алгоритм расчета радиальных зазоров.

Литература

1. А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий «Основы проектирования авиационных двигателей и энергетических установок» Том 2.
2. В.П. Коронкевич, В.А. Ханов «Современные лазерные интерферометры». Новосибирск: Наука, 1985.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. Т. 1. - М.: Сов. радио, 1976. - 455 с.
4. Д.Г. Пенкин «Бесконтактные методы измерения радиальных зазоров компрессоров газотурбинных двигателей в процессе опытных испытаний». Измерения, контроль, диагностика 2008 г.

Поступила в редакцию 01.06.2012

А.А. Іноземцев, С.В.Бажин, М.А. Снітко. Питання оптимізації радіальних зазорів ТВТ авіаційного ГТД

Сформульовано завдання оптимізації величини радіального зазору. Виконаний огляд основних методів виміру радіального зазору над торцями робочих лопаток газотурбінного двигуна. Розглянуто їх переваги і недоліки. Описана методика перевірки коректності результатів виміру радіального зазору при випробуваннях газотурбінного двигуна. Показано, що результати, отримані із застосуванням ємкісної і мікрохвильової систем виміру достатньою мірою (0,08 мм) співвідносяться з результатами розрахунків. Описаний загальний підхід до побудови і налаштування розрахункових моделей радіального зазору.

Ключові слова: радіальний зазор, турбіна високого тиску, робоча лопатка, система виміру радіального зазору, авіаційний газотурбінний двигун.

A.A. Inozemcev, S.V. Bazhin M.A. Snitko. Issues of HPT tip clearances optimization in aero gas turbine engine

A problem of tip clearance optimization has been defined. Main methods of blades tip clearance measuring in gas turbine engine have been reviewed. A procedure of validating the results of tip clearance measurement during gas turbine engine tests has been described. Its advantages and disadvantages have been discussed. It has been shown that the results achieved using capacity and microwave measuring systems give a reasonable match (0.08 mm) with calculations results. A general approach to generation and setting of models for tip clearance calculation has been described.

Key words: tip clearance, high pressure turbine, blade, tip clearance measuring system, aero gas turbine engine.