

УДК 621.317.2

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e60a8d2040.11682040

А.В. Минеев, В.Х. Ясовеев  
(г. Уфа, Уфимский государственный авиационный технический университет)

## **АНАЛИЗ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ ПО АСПЕКТУ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

*Проанализированы противоречивые требования к системам измерения радиальных зазоров. Дана оценка метрологическому обеспечению как наиболее важному фактору при выборе технологии измерения радиальных зазоров. Систематизированы технические требования, предъявляемые к метрологическому обеспечению для каждой технологии измерения радиальных зазоров.*

*The conflicting requirements for radial clearance measurement systems are analyzed. The assessment of metrological support is given as the most important factor when choosing a technology for measuring radial clearances. Technical requirements for metrological support for each technology for measuring radial gaps are systematized.*

*Ключевые слова: радиальный зазор, метрологическая установка, газотурбинный двигатель, технология измерения.*

*Keywords: radial clearance, metrology unit, gas turbine engine, measurement technology.*

### **Введение**

В связи с необходимостью создания авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) новых поколений с конкурентоспособными техническими характеристиками, крайне актуальной является задача обеспечения современными промышленными средствами измерения. Одним из ресурсов, направленных на увеличение коэффициента полезного действия (КПД) авиационного ГТД, кроме повышения температуры газов перед турбиной, является комплекс конструкторских, технологических решений, направленных на предельно возможное уменьшение радиальных зазоров (РЗ). Ряд исследований [1,2] показывает, что увеличение относительной величины РЗ по торцам рабочих лопаток (РЛ) на 1% вызывает снижение КПД турбины на 1-2%, что обуславливает возрастание удельного расхода топлива Суд на 1,5...2%. Такое же изменение РЗ в компрессоре добавляет прирост Суд еще на 1,5...3%. Система измерения РЗ (СИРЗ) востребована как необходимая составная часть комплексных систем диагностики современных и перспективных ГТД. По функциональному назначению стадии применения и техническим характеристикам различают СИРЗ стендового и штатного (бортового) применения. СИРЗ стендового применения используются на этапе проектирования и доводки ГТД. Необходимость исследования

изменения величин радиальных зазоров РЛ на этапе проектирования и доводки ГТД продиктовано потребностью получения данных:

- для оценки наличия или отсутствия взаимодействия рабочих лопаток и статорных узлов ГТД на стационарных и динамических режимах работы;
- уточнения теоретических исследований и математической модели изменения параметров силовой установки;
- разработки мероприятий по улучшению параметров существующих и обеспечению расчётных данных перспективных ГТД.

К СИРЗ бортового назначения предъявляются более «жесткие» технические требования (ресурс, массогабаритные параметры, надежность, трудоемкость обслуживания, условия эксплуатации и т.д.). Необходимость применения бортовой СИРЗ в составе системы управления и диагностики объясняется ее функциональным назначением:

- неотъемлемый функциональный блок системы активного управления радиальными зазорами (САУРЗ) с обратной связью;
- уменьшение временных и финансовых издержек в процессе эксплуатации ГТД.

В России и за рубежом существует большое число систем бесконтактного измерения РЗ (радиолокационный в микроволновом диапазоне частот, емкостный, вихретоковый, оптико-электронный) [3]. Несмотря на доступность СИРЗ, построенных на различающихся физических способах измерения, практика их применения пока ограничена нерегулярными эпизодическими испытаниями на стендах при доводке опытных образцов ГТД [4].

Тенденция модульного конструирования авиационной техники, в том числе измерительной, продиктована требованиями снижения финансовых и временных издержек, взаимозаменяемости, унификации, ремонтпригодности и т.д. СИРЗ, в общем случае состоит из следующих функциональных модулей: блок обработки сигналов (БОС), N-число измерительных зондов (ИЗ) (включают в себя: установочный объектив, канал приема/передачи, первичный преобразователь). Такая «разбивка» на функциональные модули позволяет специализировать агрегаты на решение конкретных задач. Сложность, неоднородность и разнообразие конструкции ГТД являются немаловажными факторами, препятствующими созданию универсальной СИРЗ. Данное обстоятельство объясняется:

- переменной высотой межконтурного пространства в области компрессора, что приводит к необходимости создания унифицированной линейки ИЗ;
- тенденцией минимизации размеров установочных отверстий в статорной оболочке, предназначенных для установки ИЗ;
- разнообразием габаритных размеров и геометрией торцевой поверхности РЛ (для РЛ компрессора высокого давления КВД характерна плоская торцевая поверхность, максимальная толщина профиля, в периферийном сечении которой может достигать 1 мм, торцы РЛ

современных турбин имеют сложную форму, определяемую «изнашиваемыми» выступами бандажных полок).

- доступом для обслуживания при наличии «развитой обвязки» на внешней стороне корпуса газогенератора.

Задача создания универсальной СИРЗ для решения всего спектра задач (измерение РЗ на всех ступенях компрессора и турбины ГТД), с учетом перечисленных и других особенностей, является невероятно сложной. Поставленная задача решается узкой «специализацией» отдельных измерительных зондов на решение конкретных задач. Таким образом, одним из основополагающих факторов при выборе технологии измерения РЗ является возможность создания и обеспечения на базе потребителя средства метрологического оснащения для снятия градуировочной характеристики и проведения периодических поверок ИЗ.

### Анализ классификации систем измерения радиальных зазоров по аспекту метрологического обеспечения

В общем случае вне зависимости от выбранного метода измерения РЗ, метрологическая установка для проведения градуировки и поверки СИРЗ (рис.1) должна включать следующие основные блоки:

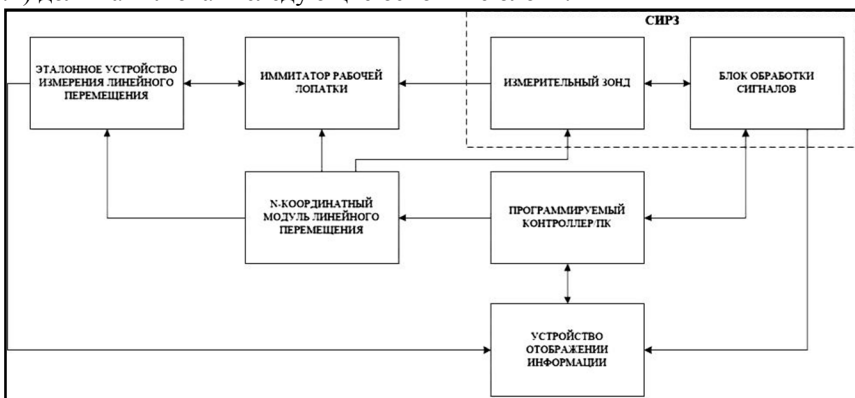


Рис.1. Общая структурная схема метрологической установки для СИРЗ

- N – координатный модуль линейного перемещения (актуатор), предназначенный для прецизионного перемещения в горизонтальных и вертикальных плоскостях имитатора РЛ либо установочный объектив измерительного зонда в заданном диапазоне, имитируя изменение радиального зазора. В зависимости от метода измерения РЗ, число координат перемещения N может быть от одного (x) до трех (x; y; z). Модуль линейного перемещения представляет собой сложный интегрированный электромеханический комплекс, сочетающий в себе различные типы линейных направляющих (скольжения, качения (с опорными роликами), профильные рельсовые), систему приводов (гайка – винт, шарико-винтовая передача, зубчатый ремень, зубчатая рейка, линейный двигатель). Мировыми

лидерами – изготовителями прецизионных модулей линейного перемещения являются японские, немецкие и тайваньские компании.

- Программируемый контроллер или персональный компьютер (ПК) с установленным специализированным программным обеспечением. Блок служит для автоматизации и контроля движения в масштабе реального времени и хранения программы алгоритмов.

- Эталонное устройство измерения линейного перемещения служит для непрерывного контроля изменения перемещений и регистрации изменения погрешности установки. Осуществляет преобразование перемещения имитатора рабочей лопатки относительно торца установочного объектива измерительного зонда в цифровой код и передачу на устройство отображение информации. На основе прямого сравнения с фактическими значениями, измеренными эталонным устройством, контролируется достоверность линейных перемещений. В качестве эталонного устройства необходимо применять датчик линейных перемещений, внесенный в ГОСРЕЕСТР средств измерения (СИ), что упростит метрологическую аттестацию установки и прохождение периодической поверки.

- Имитатор рабочей лопатки.

- Устройство отображения информации (или ПК).

Проанализировав особенности работы, технические характеристики, концептуальные технические решения экспериментальной, опытной аппаратуры, предлагаемой как зарубежными, так и отечественными изготовителями СИРЗ, справедливо заключить, что структура и технология метрологического обеспечения для каждого из методов являются индивидуальными.

Наибольшими особенностями, в части метрологического обеспечения, обладает радиолокационный (микроволновый) метод измерения РЗ, представляющий собой адаптированный к условиям применения ГТД фазовый способ измерения расстояния с использованием электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона [5]. По данной технологии измерения РЗ определяют через измерение разности фаз излучаемого и принятого отраженного от РЛ сигналов. Особенностью и в то же время наиболее весомым недостатком микроволнового метода измерения РЗ является то, что во время измерения облучению сигналом от датчика (антенны) подвергается не только торец РЛ, но и другие элементы ГТД. Результирующий сигнал, принимаемый антенной, является совокупностью отраженных сигналов от элементов ГТД. Это требует использования сложных алгоритмов обработки результирующего сигнала и ограничивает возможность получения результатов измерений в масштабе реального времени. Таким образом, метрологическая установка для микроволновых систем должна повторять геометрию ступени ГТД, а также вращение имитаторов РЛ для получения интерферирующих результирующих отраженных сигналов. Это в значительной степени влечет удорожание и конструктивное усложнение метрологической установки.

В отечественной промышленности заметных результатов достигли специалисты ИПУСС РАН в сотрудничестве с ОАО «Кузнецов (НПО «Труд», СНТК им. Н.Д. Кузнецова) в проекте создании СИРЗ на основе вихретоковых преобразователей (ВТП). На основе ВТП было разработано несколько поколений систем [6]. Для получения достоверной градуировочной характеристики вихретоковой СИРЗ необходимо предусмотреть температурную коррекцию. Это вызвано изменением информативного параметра датчика из-за воздействия температурных воздействий и, как следствие, эквивалентное изменение индуктивностей в обмотках согласующих трансформаторов [7]. Данное обстоятельство приводит к необходимости моделирования температурного поля при градуировке и поверке вихретоковых СИРЗ.

Разработку и промышленное производство СИРЗ стендового применения осуществляет французская компания FOGALE nanotech Inc. Аппаратура разработана на основе емкостной технологии измерения с применением модульной структуры. Многоканальный блок обработки информации со встроенным программным обеспечением совместно с термостойкими кабелями и охлаждаемыми зондами-датчиками обеспечивают регистрацию и постобработку потоковой информации. Необходимо отметить отсутствие взаимозаменяемости указанной аппаратуры зондов-датчиков, коаксиальных кабелей, что обуславливает необходимость совместной градуировки зонда-датчика с кабелем на эталонных моделях РЛ.

Для технологий измерения, основанных на электрических эффектах (емкостный, вихретоковый), характерна существенная зависимость результатов измерений от электромагнитных свойств контролируемых объектов (элементов ГТД). Также к недостаткам следует отнести критичность к форме поверхности и изменению геометрии торца РЛ. Неоднородная геометрия РЛ (характерная, в частности, для турбины низкого давления), зависимость измерений от облучаемой площади РЛ приводят к необходимости снятия градуировочной характеристики по всей площади торца РЛ на заданном диапазоне РЗ. Это приводит к необходимости построения метрологической установки на базе трехосевого модуля линейного перемещения.

Таким образом, для градуировки измерительных зондов СИРЗ, основанных на электрических эффектах, метрологическая установка должна включать эталонную модель РЛ, повторяющую ее геометрические и электромагнитные свойства. Для получения достоверных данных, как и для микроволновых систем, необходимо повторить геометрию элементов ступени ГТД, оказывающих электромагнитное воздействие на чувствительный элемент.

Ретроспективный анализ информации от различных источников показывает, что для создания СИРЗ на основе оптико-электронных технологий измерения наиболее перспективным является направление, связанное с применением разветвленных волоконно-оптических жгутов [4,8].

Экспериментальные образцы оптико-электронных СИРЗ показали эффективность такого способа измерения РЗ на компрессоре низкого давления при испытаниях в составе ГТД.

Применение логотрического метода позволяет нейтрализовать недостаток, связанный с зависимостью результатов измерений от оптических свойств отражающей поверхности, характерный для оптико-электронных методов измерений. Широкая доступность оптических компонентов позволяет получить необходимую апертуру выходного пучка излучения, тем самым сформировать достаточно малый диаметр светового потока на торце РЛ и исключить влияние ее сложной геометрии на результаты измерений. Важным преимуществом всех методов оптико-электронной технологии измерения является отсутствие влияния электромагнитных свойств контролируемого и окружающих объектов на результирующий информативный сигнал. Перечисленные особенности исключают необходимость применения эталонной модели РЛ с идентичными геометрическими и электромагнитными характеристиками оригинальной РЛ. Также к преимуществам следует отнести отсутствие влияния высоких температур на результирующий информативный сигнал, «достаточность» градуировки по одной координате, в статическом режиме (без имитации роторной установки), в пределах изменения РЗ.

### **Выводы**

1. В связи с необходимостью снятия индивидуальных градуировочных характеристик СИРЗ, нацеленных на решение отдельных задач (диапазон изменения РЗ, разрешающая способность, условия эксплуатации и т.д.) и проведения периодических проверок измерительных зондов с целью снижения экономических и временных издержек на решение перечисленных операций, одним из основополагающих факторов при выборе технологии СИРЗ является возможность обеспечения лабораторной базы потребителя оптимальной метрологической установкой.

2. Анализ бесконтактных средств измерения радиальных зазоров по аспекту метрологического обеспечения показывает наиболее перспективное направление для создания как стендовой исследовательской, так и штатной бортовой аппаратуры измерения РЗ на основе инновационных решений с применением разветвленных волоконно-оптических жгутов. Такая технология измерения менее критична к материалам, геометрии РЛ, не требует проведения температурной коррекции, позволяет снимать градуировочную характеристику в статическом режиме.

### **Список литературы**

1. *Зотов, В.А.* Исследование радиальных зазоров-источников больших потерь / В.А. Зотов, М.И. Цаплин // 75 лет творческой научно-практической деятельности ЦИАМ в авиадвигателестроении. – 2005. – С.250-251.
2. *Авиационный двигатель ПС-90А* / А.А. Иноземцев, Е.А. Коняев, В.В. Медведев, А.В. Нерадько, А.Е. Ряссов; под ред. А.А. Иноземцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 320 с.

3. *Минеев, А.В.* Классификация способов измерения радиальных зазоров / А.В. Минеев, В.Х. Ясовеев // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: материалы I Международной научно-технической конференции / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2017. –С. 119-125.
4. *Губайдуллин, И.Т.* Анализ основных технических требований, предъявляемых к системам измерения радиальных зазоров авиационных двигателей/ И.Т. Губайдуллин, А.В. Минеев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч. – техн. конф. 12 - 14 сентября 2018 г. – Самара, 2018. –С. 47-49.
5. *Иноземцев, А.А.* Микроновые системы измерения радиальных зазоров ГТД. /А.А. Иноземцев, М.А. Снитко, В.К. Сычев, Масловский, М.Г. Бакулин, И.С. Табачук. // Авиационная промышленность. – 2013. –№2. – С. 29-32.
6. *Боровик, С.Ю.* Одновитковые вихретоковые преобразователи для измерения механических параметров. / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – №4(42). – С. 94-101.
7. *Боровик, С.Ю.* Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков/ С.Ю. Боровик, М.М. Кутейкин, Ю.Н. Секисов [и др.] // Автометрия. – 2017. –№ 4. – С. 104–111.
8. *I. García.* Desarrollo de un sensor de fibra óptica para la medida del tip clearance y tip timing en motores aeronáuticos // Sensors. – 2017.

*Материал поступил в редколлегию 15.10.18.*

УДК 621.396

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e60b9a2324.97778914

А.Д. Поздняков, А.А. Калюжный  
(г. Владимир, Владимирский государственный университет)

## **ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ И НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА В РАДИОКАНАЛЕ МЕТОДОМ СТРОБИРОВАНИЯ**

*Рассмотрено применение метода стробирования при оценке неустойчивости и отклонения частоты. Проведено компьютерное моделирование радиоканала для определения границ применимости метода.*

*The application of the gating method in the evaluation of instability and frequency deviation is considered. A computer simulation of the radio channel was carried out to determine the limits of applicability of the method.*

*Ключевые слова: стробирование, неустойчивость частоты, радиоканал.*

*Key words: gating, frequency instability, radio channel.*

Для оценки смещения и неустойчивости частоты периодического сигнала с низким уровнем шума в радиоканале можно использовать методы обработки сигнала во временной области, достоинствами которых являются