

УДК 629.3.062.3

А.В. МАСЛОВСКИЙ

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

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ РОТОРНЫХ МАШИН

Рассмотрены особенности построения и применения радиолокационных систем для измерения радиальных зазоров роторных машин при их функционировании в условиях воздействия высоких температур и вибраций. Предложен вариант построения радиолокационной системы с повышенной точностью измерения радиальных зазоров.

радиальный зазор, роторные лопасти, температурное расширение, вибрация, точность измерения, радар, фазовый метод, СВЧ сигнал, волновод

Как известно [1], увеличение относительных радиальных зазоров газотурбинных двигателей (ГТД), расстояния между внутренней поверхностью корпуса и торцами роторных лопаток, на 1% приводит к снижению к.п.д. примерно на 3% и перерасходу топлива почти на 10%.

В процессе работы роторной машины различные элементы газоздушного тракта под воздействием температуры в разной степени изменяют свои линейные размеры, поэтому возможно либо чрезмерное увеличение радиального зазора, либо задевание роторных лопаток за корпус. Измерение истинного значения радиальных зазоров в процессе функционирования ГТД и использование результатов измерения для управления величиной зазоров в процессе испытаний и штатной эксплуатации роторных машин позволяет существенно улучшить их технико-экономические параметры и надежность.

Для практического измерения величины радиальных зазоров ГТД применяют аппаратуру, основанную на использовании механических или неконтактных (емкостных, вихрековых, оптических и др.) первичных преобразователей (датчиков). Механические датчики в виде различных щупов и конструкций не позволяют измерять радиальные зазоры при их увеличении и в большинстве случаев не обеспечивают оперативный контроль. Недостатком

перечисленных неконтактных датчиков является сложность обеспечения требуемой точности измерения радиальных зазоров при воздействии на первичные преобразователи высокой температуры, что затрудняет их использование на турбинах низкого и высокого давления.

Для измерения радиальных зазоров также может быть использован радиолокационный метод, представляющий собой адаптированный к ГТД фазовый метод измерения расстояний с использованием электромагнитных СВЧ колебаний [2], который заключается в том, что расстояние l , пройденное до отражающего объекта, определяют через измерение разности фаз $\Delta\varphi$ излучаемого и принятого сигналов:

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

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 [3], например:

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

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

U_0 – амплитуда напряжения фазового детектора.

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

$$\Delta\varphi = \varphi_1 + 2\pi n, \quad (3)$$

где $\varphi_1 = \arcsin (U_{\text{вих}}/U_0)$ – значение разности фаз, лежащее в диапазоне $0 < \varphi_1 < 2\pi$;

$n = 0, 1, 2, \dots$ – целое число.

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

$$l = \lambda (\varphi_1 + 2\pi n) / 4\pi. \quad (4)$$

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). Упрощенная структурная схема радиолокационной системы для измерения радиальных зазоров приведена на рис. 1.

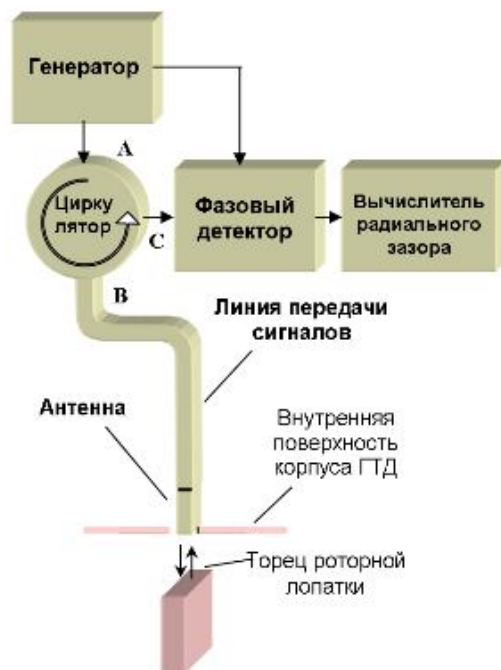


Рис. 1. Структурная схема радиолокационной системы для измерения радиальных зазоров

Основное преимущество радиолокационного измерения радиальных зазоров состоит в том, что в точке измерения радиальных зазоров над верхними кромками роторных лопаток устанавливается только приемо-излучающая антенна, а радиоэлектронная аппаратура, обеспечивающая формирование зондирующих сигналов, прием отраженных сигналов и их обработку (СВЧ блок) размещается в «комфортных»

условиях на удалении от «горячей» точки в которой установлена антенна. При этом передача зондирующих сигналов от СВЧ блока к антенне и отраженного сигнала от антенны к СВЧ 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 ($-60 \dots +1200$ °С) при воздействии на измерительное оборудование вибрации (до 10...50 g) сложной спектральной структуры.

Различные радиолокационные системы измерения радиальных зазоров могут отличаться между собой рабочей длиной волны, типом и конструкцией антенн и линий передачи сигналов, реализованными методами минимизация влияния температуры и вибрации на результаты измерения, принципами калибровки.

Как следует из (4) для расширения диапазона однозначного измерения радиальных зазоров необходимо 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 линий передачи сигналов и снижается абсолютная точность измерения. Поэтому выбор используемой длины волны определяется исходя из требований на точность и диапазон измерения с учетом геометрии элементов, находящихся в зоне облучения, а также габаритных ограничений на монтаж системы.

В наибольшей степени габаритные ограничения сказываются на конструкции антенны, которая должна монтироваться либо в имеющемся отверстии, используемом обычно для других целей, либо в специально выполняемом в корпусе ГТД отверстии минимального диаметра. Учитывая, что антен-

на должна эффективно и надежно сопрягаться с линией передачи сигналов, целесообразно оба эти элемента выполнять либо волноводными, либо коаксиальными.

Основным преимуществом коаксиальных линий связи является возможность [4] 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 при передаче и необходимость использования коаксиальной антенны, которая содержит элементы, выступающие внутрь проточной части ГТД.

Преимуществами волноводных линий передачи сигналов (полых трубок прямоугольного или круглого сечения) являются простота их охлаждения, относительно низкое затухание, стабильность и одномоновость 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 или $\lambda > 1,6A$, где A – ширина широкой стенки прямоугольного волновода.

В фазовых системах измеряется фаза, обусловленная прохождением электромагнитной волны от генератора колебаний, через направленный элемент, например, циркулятор, линию передачи сигналов, антенну, среду распространения до торца роторной лопатки и обратно через среду распространения, антенну, линию передачи сигналов, соединительные и вспомогательные элементы к фазовому детектору, на второй вход которого подается опорный сигнал.

При эксплуатации системы измерения радиаль-

ных 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 $\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$), титанового ($\alpha = 9 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$) или медного ($\alpha = 18 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$) сплава длиной 500 мм на 300 °C 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 °C, 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 ГТД 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.

На рис. 2 приведена структурная схема радиолокационной системы, которая обеспечивает повышенную по сравнению с классическими системами точность измерения радиальных зазоров при проведении испытаний ГТД.

Система содержит два конструктивно идентичных, размещенных рядом и подвергающихся одинаковому воздействию температуры и вибрации канала – измерительный и опорный. Каналы отличаются тем, что в измерительном применяется волноводная

антенна с прямоугольным приемо-излучающим раскрывом для измерения фазы сигнала от торца роторной лопадки, а в опорном вместо раскрыва установлен отражатель, который определяет фазу сигнала в опорном канале.

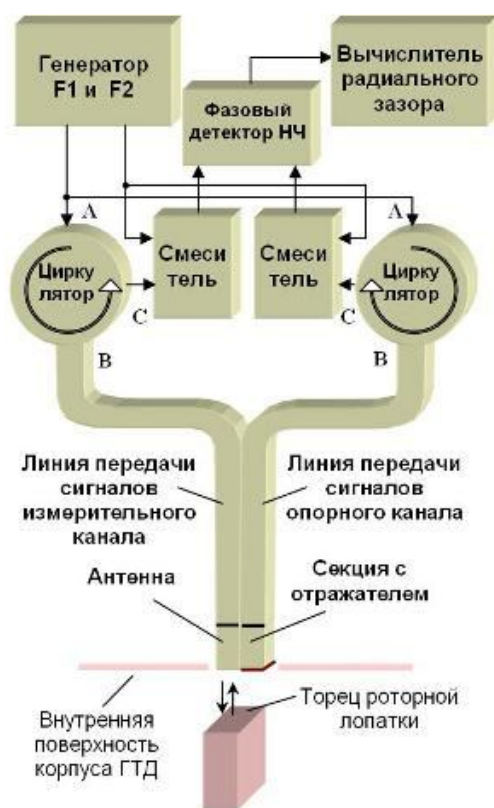


Рис. 2. Структурная схема радиолокационной системы для измерения радиальных зазоров с улучшенными характеристиками

Система работает следующим образом. Электромагнитные СВЧ колебания с частотой F_1 от генератора поступают через циркулятор на линию передачи сигналов измерительного канала, затем на антенну и излучается внутрь проточной части. Сигнал отразившийся от торца роторной лопадки до которой измеряется зазор через линию передачи поступает на вход В циркулятора и с его выхода С подается на смеситель. На второй вход смесителя подается сигнал с частотой $F_2 = F_1 \pm (100 \dots 10000) \text{ кГц}$ синхронизированный по фазе с сигналом первого генератора. На выходе смесителя формируется сигнал с частотой $100 \dots 10000 \text{ кГц}$, фаза которого зависит от длины тракта измерительной системы и измеряемого радиального зазора.

Опорный сигнал работает аналогично измерительному, но фаза сигнала на выходе его смесителя зависит только от длины измерительного тракта. Поскольку конструктивно каналы идентичны и могут быть выполнены в виде единого модуля, то при воздействии температуры и вибрации фаза сигнала, обусловленная прохождением сигналов по измерительному тракту будет изменяться одинаково в опорном и измерительном каналах, а сигнал на выходе низкочастотного фазового детектора будет определяться только величиной радиального зазора.

Лабораторные экспериментальные исследования выполненные на газогенераторе двигателя ТВ2-117 показали перспективность использования предложенной схемы построения радиолокационного измерителя величины радиальных зазоров газотурбинных двигателей.

Литература

1. Прокопец А.О., Ревзин Б.С., Рожков А.В. Проектирование систем оптимизации радиальных зазоров // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 4. – С.14-16.
2. Супряга Н.П. Радиолокационные средства непрерывного излучения. – М.: Воениздат, 1974. – 126 с.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970: Пер. с англ. (в четырех томах); Под общей ред. К.Н.Трофимова; Т. 3. Радиолокационные устройства и системы; Под ред. А.С. Веницкого. – М.: Сов радио, 1978. – 528 с.
4. Чернушенко А.М., Майборода А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн / Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.

Поступила в редакцию 31.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Л. Горелик, Центральный институт экономики информатики и систем управления, Москва.