

УДК 629.3.062.3

А.В. МАСЛОВСКИЙ, И.С. ТАБАЧУК, М.Г. БАКУЛИН

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ В МИКРОВОЛНОВЫХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН

Рассмотрена математическая модель микроволновой системы контроля параметров лопаточных машин (газотурбинных двигателей) с использованием инструмента фазовых портретов. Проанализировано влияние зазора между внутренней поверхностью корпуса двигателя и торцом роторных лопаток на параметры фазового портрета этих лопаток и на основе этого анализа предлагается алгоритм обработки информации для микроволнового измерения реальных зазоров работающего двигателя. Приводятся результаты измерения зазоров ТВД газотурбинного двигателя, во время его стендовых испытаний.

Ключевые слова: микроволновый датчик, радиальный зазор, роторные лопатки, фазовый портрет.

Введение

В последние годы в мире всё больший интерес проявляется к использованию микроволновых методов для контроля состояния и диагностики газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2] и, в частности, для измерения радиальных зазоров между внутренней поверхностью корпуса двигателя и торцом каждой роторной лопатки. Для реализации потенциально достижимых характеристик микроволновых измерителей радиальных зазоров (РЗ) требуется применение новых схем построения микроволновых модулей и оригинальных методов обработки сигналов, которые должны базироваться на понимании процесса формирования отраженных сигналов. Классические методы расчета электромагнитного поля внутри такой сложной структуры, как проточная часть ГТД являются весьма громоздкими и плохо приспособлены для практической оценки влияния на параметры сигналов геометрии объектов, величины РЗ, частоты вращения, температуры, давления и пр. Невозможность контролируемого изменения зазоров на работающем двигателе затрудняет обнаружение и анализ признаков величины РЗ, содержащихся в сигналах полученных экспериментально.

В связи с этим актуальной является задача обнаружения и анализа признаков, содержащихся в сигнале микроволнового датчика и несущих информацию о величине РЗ, с использованием моделирования всей системы.

1. Принцип действия и особенности микроволновой системы измерения зазоров

В основе общего принципа действия различных микроволновых измерительных систем лежит излу-

чение радиосигнала в направлении объекта и прием отраженного от него сигнала. По параметрам принятого сигнала можно судить о характеристиках облучаемого объекта.

Радиолокационные принципы измерения расстояния до объекта, параметров его движения, идентификация и т.п., хорошо известны [3]. Они основаны на измерении запаздывания принимаемого сигнала относительно излучаемого, а также анализе искажения его формы или спектра при использовании широкополосных сигналов. Эти принципы хорошо реализуются и теоретически обосновываются при выполнении условия, что объект находится 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 точечные источники.

Совершенно другая картина наблюдается при использовании микроволновых методов для измерения зазора в ГТД (рис. 1). Измеряемой величиной является расстояние между торцом лопатки и внутренней поверхностью корпуса. Путем некоторого пересчета эта величина может быть вычислена, если известно расстояние между источником излучения и торцом лопатки, когда лопатка находится на радиусе между точкой вращения и источником излучения, т.е. в момент, когда это расстояние минимально (отрезок АВ на рис. 1). Следовательно, цель радиолокационного (микроволнового) измерения заключается в обнаружении момента нахождения лопатки на наименьшем расстоянии от антенны и измерении в этот момент фазы сигнала, отраженного от торца лопатки.

Измеряемое расстояние (0 ... 10 мм) соизмеримо с длиной волны измерителя, поэтому падающая волна не может считаться плоской, а источник излучения и отражатели являются протяженными.

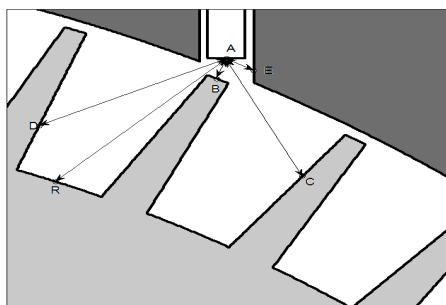


Рис. 1. Принцип формирования сигнала на раскрые антенны микроволновой системе измерения РЗ

Помимо сигнала отраженного от торца лопатки на входе антенны присутствуют (рис. 1) также сигналы отраженные от других поверхностей: от боковых поверхностей лопаток (AC и AD), основания роторных лопаток или поверхности роторного колеса (AR), корпуса (AE). Причем эти поверхности могут иметь площади больше, чем площадь торца лопатки. В такой ситуации классическая теория радиолокации не позволяет однозначно определить полезную составляющую сигнала, несущую информацию о зазоре. Описание сигнала с помощью теории электромагнитного поля так же затруднительно из-за сложной геометрии поверхностей. Поэтому в данной статье предлагается подход, основанный на использовании точечной модели системы.

2. Описание точечной модели

Для наглядности рассматривается двумерное сечение ГТД в плоскости перпендикулярной оси вращения и проходящей через центр антенны (рис. 2). Будем полагать, что используется одна и та же антенна и на излучение, и на прием. Аппроксимируем контуры сечения кусочно-ломанными линиями равной длины.

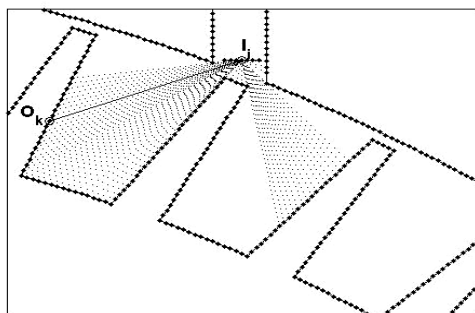


Рис. 2. Точечная модель системы

Аналогично, излучающую поверхность антенны делится на N отрезков и считается, что излучающие свойства антенны задаются совокупностью излучений всех отрезков. При малом шаге

дискретизации ($d \ll \lambda$) излучение i -го отрезка можно заменить излучением точки I_i , расположенной в центре отрезка. В этом случае, излучение осуществляется в нижнюю полусферу с одинаковым для всех направлений уровнем. Каждая излучающая точка характеризуется потенциалом $s_i = A_i e^{j\varphi_i} s_t$, определяемым амплитудой A_i и фазой φ_i возбуждающего поля, где s_t – сигнал передатчика, возбуждающий раскрыв антенны. Соответственно, излучение антенны, будет характеризоваться вектором $S = [s_1 \dots s_N]^T$, где $[]^T$ – обозначает операцию транспонирования.

Поле, излучаемое точкой антенны I_i , достигает k -ю точку O_k , принадлежащую внутренней поверхности двигателя, и создает на ней потенциал

$$x_{k,i} = \gamma_{k,i} s_i, \quad (1)$$

где $\gamma_{k,i}$ – амплитудно-фазовый множитель, характеризующий комплексный коэффициент передачи от i -й точки антенны к k -й точке поверхности. Он определяется как

$$\gamma_{k,i} = \theta_{k,i} R_{k,i} e^{j \frac{2\pi D_{k,i}}{\lambda}}, \quad (2)$$

где $\theta_{k,i}$ – индикатор видимости k -й точки поверхности i -й точкой антенны, $\theta_{k,i} = 1$, если точка ви-

дима, и $\theta_{k,i} = 0$, если точка невидима; $R_{k,i} = \frac{\psi_{k,i}}{\pi}$ – множитель, характеризующий часть мощности, которая попадает на k -й отрезок, и зависящий от сектора обзора $\psi_{k,i}$ данного отрезка со стороны i -й точки; $D_{k,i}$ – расстояние от i -й точки антенны до k -й точки поверхности.

Суммируя потенциалы, создаваемые полем от каждой точки антенны в точке O_k , получим

$$x_k = \sum_{i=1}^N \gamma_{k,i} s_i = \gamma_k S, \quad (3)$$

где $\gamma_k = [\gamma_{k,1} \dots \gamma_{k,N}]$ – вектор-строка комплексных коэффициентов передачи от всех точек антенны к k -й точки поверхности.

Для всех точек поверхности векторный потенциал будет записываться в виде

$$X = \Gamma S, \quad (4)$$

где Γ – матрица, образованная из векторов γ_k .

Вектор потенциалов X является результатом облучения полем антенны. Однако, теперь каждая точка поверхности становится вторичным источником излучения. И теперь на k -ю точку поверхности также поступают сигналы, переизлученные другими

точками. В результате для k -й точки можно записать

$$x_k^{(1)} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^M w_{k,m} x_m, \quad (5)$$

$$w_{k,m} = \vartheta_{k,m} \alpha_m e^{j\pi} \rho_{k,i} e^{j \frac{2\pi \Delta_{k,i}}{\lambda}}, \quad (6)$$

где $\vartheta_{k,m}$ – индикатор видимости k -й точки m -й точкой поверхности; α_m – коэффициент отражения от поверхности, на которой находится m -я точка; $\rho_{k,m} = \frac{\phi_{k,m}}{\pi}$ – множитель, характеризующий часть мощности, которая падает на k -й отрезок от m -й точки поверхности, с учетом сектора обзора $\phi_{k,m}$ данного отрезка со стороны m -й точки; $\Delta_{k,m}$ – расстояние между m -й и k -й точками поверхности.

Верхний индекс в $x_k^{(1)}$ обозначает, что этот потенциал является результатом первого переотражения. В векторно-матричном виде можно записать итерационный процесс вычисления вектора потенциалов на точках двигателя при n переотражениях

$$\mathbf{X}^{(n)} = \mathbf{W} \mathbf{X}^{(n-1)} + \mathbf{G} \mathbf{S}, \quad (7)$$

где $\mathbf{W}$ – матрица с элементами $w_{k,m}$, определяемыми выражением (6).

Из (7) можно получить выражение для вектора потенциалов в установившемся режиме

$$\mathbf{X}^{(\infty)} = (\mathbf{I} - \mathbf{W})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{S}. \quad (8)$$

Установившееся излучение каждой точки поверхности, возвращается к точкам антенны виде вектора потенциалов

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \mathbf{X}^{(\infty)}, \quad (9)$$

где $\mathbf{H}$ – матрица с элементами

$$h_{i,k} = \theta_{k,i} \alpha_k e^{j\pi} \rho_{k,i} e^{j \frac{2\pi D_{k,i}}{\lambda}}.$$

Вектор $\mathbf{Y}$ преобразуется в принимаемый сигнал на входе приемника

$$s_T = \mathbf{K} \mathbf{Y}, \quad (10)$$

где $\mathbf{K}$ – вектор строки коэффициентов преобразования всех точек приемной антенны.

3. Исследование точечной модели и анализ признаков изменения зазора

Для обнаружения и анализа признаков изменения зазора используется предложенная точечная модель, описываемая выражениями (1)–(10), полученная для размеров ТВД реального двигателя. На рис. 3 приведены временные диаграммы изменения амплитуды и фазы сигнала во время прохождения роторной лопатки мимо антенны (на одном лопаточном

точном периоде), для разных значений зазора (0,5 мм, 1,0 мм, 1,5 мм и 2,0 мм). На рис. 4. построены фазовые портреты (ФП) приведенных выше сигналов (фазовый портрет – это изображение сигнала на плоскости, при котором по оси абсцисс откладывается значение действительной части сигнала, а по оси ординат – мнимой).

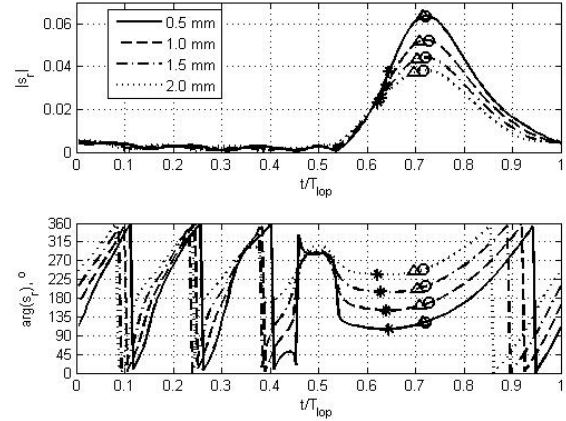


Рис. 3. Временные диаграммы сигналов на интервале одного лопаточного периода при различных зазорах

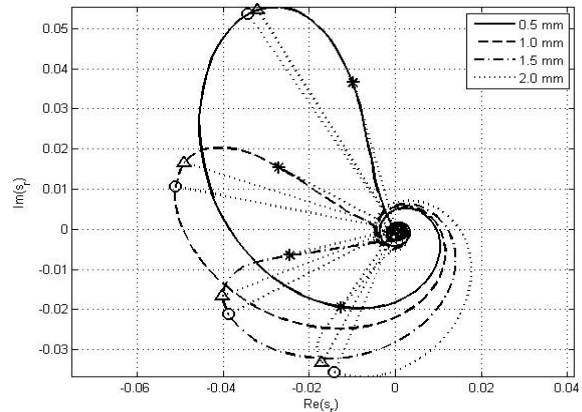


Рис. 4. Фазовые портреты сигналов на интервале одного лопаточного периода при различных зазорах

На этих же диаграммах отмечены точки, соответствующие определенным положениям лопатки относительно антенны. ‘Звездочка’ отражает момент прохода лопатки при минимальном расстоянии между антенной и какой-либо точкой лопатки, а ‘треугольник’ отражает момент, когда минимальным является расстояние между центром антенны и центром лопатки. ‘Круг’ соответствует моменту, когда амплитуда сигнала максимальна.

Из приведенных рисунков видно, что изменение зазора приводит к изменению фазы сигнала в характерных точках, и к вращению ФП. Если рассматривать фазовый портрет, как некоторую пло-

скую фигуру то путем трех линейных операций (смещения, масштабирования и вращения) его можно преобразовать к ФП, полученному при другом значении РЗ. При этом угол вращения будет характеризовать изменение величины радиального зазора, относительно базового (эталонного). Таким образом, в качестве практических алгоритмов для измерения РЗ можно использовать: алгоритм на основе измерения фазы сигнала в момент, когда его огибающая максимальна; алгоритм на основе преобразования эталонного ФП в текущий (или наоборот).

На рис. 5 приведены зависимости фазы сигнала от величины радиального зазора (модуляционные характеристики - МХ) и отклонения этих МХ от идеальной для следующих алгоритмов: 1 – алгоритм, использующий преобразование ФП; 2 – алгоритм, измеряющий фазу в момент максимума огибающей сигнала. Также, для сравнения приведены МХ и их отклонения для гипотетических алгоритмов использующих информацию о моментах прохода лопатки с минимальным расстоянием (кривая 3) и моментах с минимальным расстоянием между центрами вершины лопатки и антенны (кривая 4).

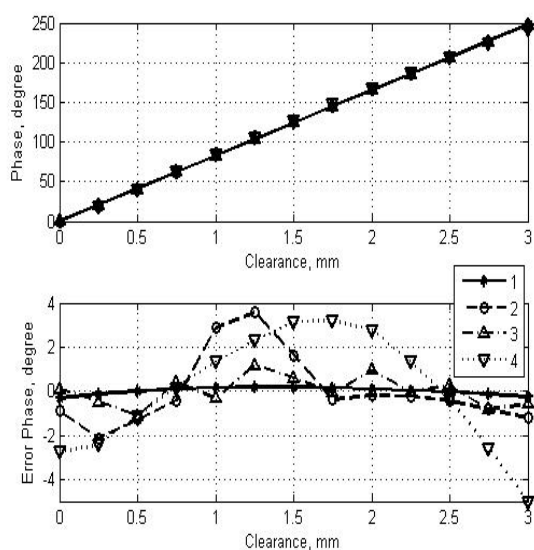


Рис. 5. Модуляционные характеристики и их отклонения от идеальной

Из кривых отклонения видно, что наилучшее приближение к идеальной линейной МХ имеет алгоритм с преобразованием фазовых портретов.

4. Практические результаты измерения радиальных зазоров

На рис. 6 приведено семейство фазовых портретов всех роторных лопаток ТВД, полученных на работающем двигателе с помощью микроволновой системы измерения радиальных зазоров.

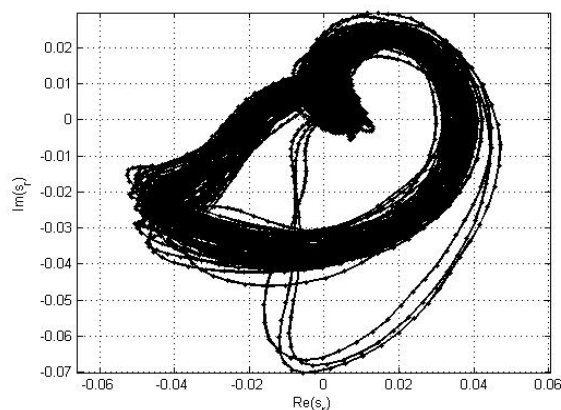


Рис. 6. Фазовые портреты всех роторных лопаток ТВД за один оборот ротора

Для возможности калибровки и настройки микроволновой системы три лопатки были обнижены на 0,4 мм относительно соседних. Угол поворота фазовых портретов этих лопаток существенно отличается от угла поворота ФП остальных лопаток.

На рис. 7 приведены фазовые портреты одной лопатки в различные моменты времени после запуска двигателя. По вращению ФП видно, как меняются зазор.

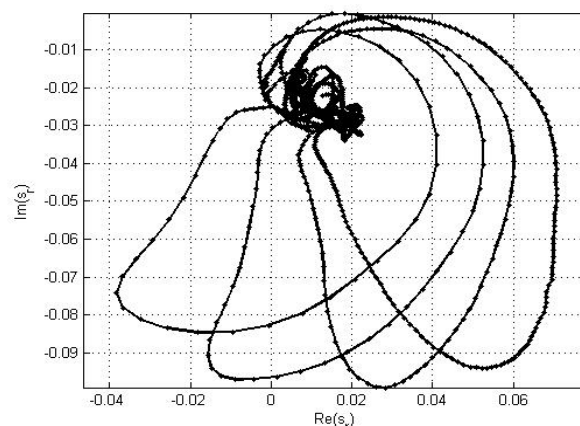


Рис. 7. Вращение вазового портрета одной лопатки при работе двигателя

На рис. 8 приведены полученные в ходе стендовых натурных изменений на работающем двигателе, зависимости изменения (относительно «холодного» состояния) радиальных зазоров двух роторных лопаток, а также частоты вращения ротора при запуске и прогреве газотурбинного двигателя.

Полученные результаты подтверждают теоретические выводы о характере изменения радиальных зазоров сразу после запуска ГТД.

Применение алгоритмов на основе фазовых портретов обеспечило измерение радиальных зазоров каждой турбинной лопатки в процессе стендовых испытаний ГТД на всех режимах его работы.

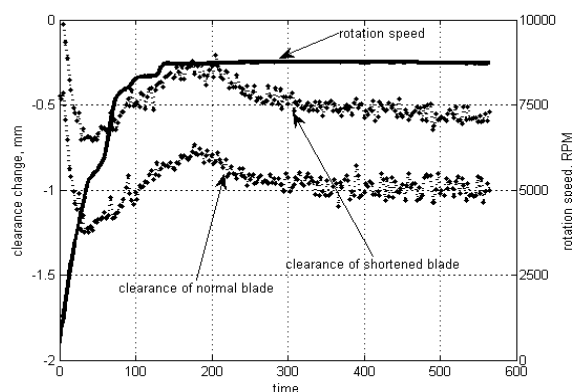


Рис.8. Изменение радиальных зазоров двух лопаток и частоты вращения ротора при запуске ГТД.

Заключение

Предложенная точечная модель формирования сигналов микроволновой системы измерения радиальных зазоров позволяет с достаточно высокой точностью на качественном уровне анализировать

различные явления, возникающие при работе двигателя и обнаруживать эффективные признаки для контроля его состояния и диагностики. Построенные с использованием методов фазовых портретов алгоритмы обеспечивают высокую точность и устойчивость измерений радиальных зазоров.

Результаты моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями и позволяют оптимизировать алгоритмы измерения РЗ.

Литература

1. Прокопец А.О. Проектирование систем оптимизации радиальных зазоров / А.О. Прокопец, Б.С. Ревзин, А.В. Рожков // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 4. – С. 14-16.
2. Geisheimer J.L. Performance testing of a microwave tip clearance sensor / J.L. Geisheimer, S.A. Billington, T. Holst // AIAA Paper 2005-3987, July 2005.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. Т. 1. – М.: Сов. радио, 1976. – 455 с.

Поступила в редакцию 29.05.2009

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

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ В МІКРОХВИЛЬОВИХ СИСТЕМАХ ВІМІРЮВАННЯ РАДІАЛЬНИХ ЗАЗОРІВ ЛОПАТКОВИХ МАШИН

О.В. Масловський, І.С. Табачук, М.Г. Бакулін

Розглянута математична модель мікрохвильової системи контролю параметрів лопаткових машин (газотурбінних двигунів) з використанням інструменту фазових портретів. Проаналізовано вплив зазору між внутрішньою поверхнею корпусу двигуна та торцем роторних лопаток на параметри фазового портрету цих лопаток і на основі цього аналізу пропонується алгоритм оброблення інформації для мікрохвильового вимірювання реальних зазорів працюючого двигуна. Приводяться результати вимірювання зазорів ТБТ газотурбінного двигуна, під час його стендових випробувань.

Ключові слова: мікрохвильовий датчик, радіальний зазор, роторні лопатки, фазовий портрет.

MICROWAVE TIP CLEARANCE MEASUREMENT METHOD OF BLADE MACHINES BY USING THE PHASE IMAGE

A.V. Maslovskiy, I.S. Tabachuk, M.G. Bakulin

Mathematical model of the microwave system for checking blade machines (gas turbine engines) parameters with use of instrument phase image is considered. The influence of the clearance between internal surface of the body of the engine and tip rotor blades on parameters of the phase portrait of these blades analysed and on base of this analysis is offered algorithm for microwave measurement of the real tip clearances for operating engine. Results of the tip clearance measurements for gas turbine engine HPT during stand test are provided.

Key words: microwave sensor, tip clearance, rotor blades, phase image.

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

Табачук Игорь Сергеевич – канд. воен. наук, Генеральный директор ООО «Радарные технологии -2Т», Москва, Россия, e-mail: tabachuk@2tgroup.com.

Бакулін Михайл Германович – канд. техн. наук, заместитель начальника отдела информационных технологий ООО «Радарные технологии -2Т», Москва, Россия, e-mail: bakulin@info2t.ru.