

УДК 629.3.062.3

А.В. МАСЛОВСКИЙ, М.Г. БАКУЛИН

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

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ПРИ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрен новый способ исследования процессов, происходящих в проточной части газотурбинных двигателей (ГТД). Предложенный способ основан на построении и анализе фазового портрета сигнала в микроволновой системе измерения радиальных зазоров. На примере математической модели показано, что изменение геометрических параметров элементов проточной части ГТД приводит к различным изменениям фазового портрета. Анализ фазового портрета позволяет обнаруживать эти изменения, измерять их и разделять вклад различных составляющих на изменение одного и того же параметра. Например, определить составляющую изменения зазора, вызванную удлинением лопатки, и составляющую, вызванную изменением размера корпуса. Приводятся результаты практического использования данного метода при стендовых испытаниях авиационного ГТД.

Ключевые слова: радиальный зазор, роторные лопатки, удлинение лопатки, осевое смещение, фазовый портрет.

Введение

Проблема измерения геометрических параметров элементов проточной части газотурбинных двигателей (ГТД) во время работы всегда была актуальной. Получение такой информации на этапе разработки позволяет более точно понять процессы, происходящие в двигателе, учесть их при проектировании и выработать рекомендации для режимов работы. Учет такой информации в процессе эксплуатации, особенно при наличии элементов управления этими параметрами, позволит повысить к.п.д. двигателя и его ресурс.

Одним из параметров проточной части ГТД, сильно влияющих на к.п.д. двигателя, является зазор между корпусом двигателя и роторными лопатками. Известно [1, 2], что увеличение относительных радиальных зазоров в турбине газотурбинного двигателя на 1% приводит к снижению к.п.д. двигателя примерно на 3% и перерасходу топлива почти на 10%. Поэтому проблеме измерения радиальных зазоров в последнее время уделяется много внимания.

Существуют разные способы измерения радиальных зазоров на работающем двигателе. Среди них наиболее перспективными можно назвать:

- оптический способ, основанный на анализе величины просвета между корпусом и лопатками;
- способ, использующий емкостные датчики;
- способ, использующий токовихревые датчики;
- способ, основанный на микроволновых (радиолокационных) измерениях.

Следует отметить, что измерения должны про-

водиться на работающем двигателе, внутри проточной части при высокой температуре (до 1700⁰С), высоком давлении (20 атм. и выше), воздействии продуктов сгорания и ионизированных частиц. В таких условиях наиболее устойчивым и надежным оказывается микроволновый метод измерения.

Привлекательность микроволновых методов заключается не только в возможности проведения измерений в «тяжёлых» условиях, но и более широкой функциональностью микроволновых датчиков.

В данной статье рассматривается метод для анализа геометрических параметров элементов проточной части газотурбинных двигателей при микроволновых измерениях, который позволяет расширить функциональность этих систем.

1. Принципы микроволновых измерений

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. 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 одноточечные

источники.

Совершенно другая картина наблюдается при использовании радиолокационных методов для измерения зазора в ГТД. Принцип действия такой измерительной системы иллюстрирует рис. 1. В корпусе ГТД выполнено отверстие, в котором установлена антенная система, состоящая из передающей антенны и одной или нескольких приемных антенн.

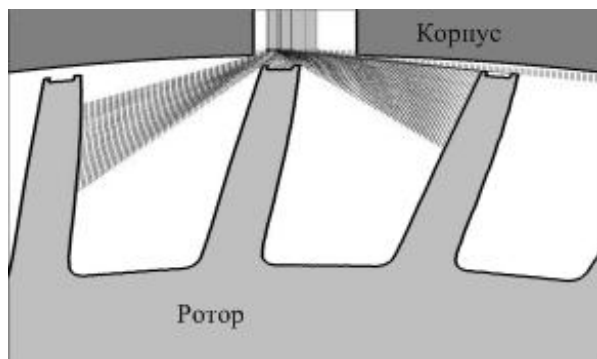


Рис. 1. Принцип формирования результирующего сигнала в радиолокационной системе измерения радиальных зазоров

Исследуемой характеристикой является расстояние между торцом лопатки и внутренней поверхностью корпуса, которая связана с расстоянием между источником излучения и торцом лопатки. Задача микроволнового измерителя заключается в обнаружении момента прохождения лопатки на наименьшем расстоянии от антенной системы и измерении в этот момент фазы сигнала, отраженного от торца лопатки.

Из-за малых габаритов передающей антенны, излучение происходит во всех направлениях. Поэтому в область видимости попадает не только исследуемый объект (торец лопатки), но и другие элементы системы. Эти элементы становятся источниками вторичного излучения.

Излучаемый передающей антенной сигнал $S_t(t)$ и принятый приемной антенной сигнал $S_r(t)$ являются узкополосными сигналами и характеризуются тремя параметрами: несущей частотой f_0 , текущей амплитудой $A(t)$ и текущей фазой $\varphi(t)$.

Варианты построения микроволновых систем и алгоритмы обработки сигналов описаны в [4]. В упрощенном виде они сводятся к преобразованию принятого сигнала и получению сигнала следующего вида

$$S_i(t) = A_r(t) \cos(\varphi_r(t) - \varphi_t(t));$$

$$S_q(t) = A_r(t) \sin(\varphi_r(t) - \varphi_t(t)),$$

где $S_i(t), S_q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие сигнала; $A_r(t)$ – текущая амплитуда при-

нимаемого сигнала; $\varphi_r(t), \varphi_t(t)$ – текущие фазы принятого и переданного сигналов.

Квадратурные сигналы дискретизируются по времени и используются для вычисления разности фаз

$$\Delta\varphi(t_n) = (\varphi_r(t_n) - \varphi_t(t_n)) = \arctg \left(\frac{S_q(t_n)}{S_i(t_n)} \right).$$

При наличии в системе только сигнала, отраженного от торца лопатки, разность фаз $\Delta\varphi(t_n)$ будет пропорциональна сумме расстояний, пройденных радиоволной от передающей антенны до торца лопатки и от торца лопатки до приемной антенны.

Таким образом, процедура измерения зазора сводится к получению отсчетов квадратурных сигналов в момент прохождения лопатки, вычислению разности фаз, пересчёту её значения в длину пути, пройденного радиоволной, и пересчёту этого значения в значение зазора.

Такая процедура давала бы абсолютно точный результат, если бы помимо сигнала, отраженного от торца лопатки, не принимались сигналы, отраженные от других движущихся и неподвижных поверхностей (рис. 1). Причем эти поверхности могут иметь эффективные площади рассеяния существенно больше, чем площадь торца лопатки. В такой ситуации требуются дополнительные конструктивные и алгоритмические способы уменьшающие влияние отражений от других поверхностей.

2. Фазовый портрет, как метод визуализации и идентификации процессов

При исследовании динамических систем может использоваться подход, основанный на фазовых траекториях и фазовых портретах. Под фазовой траекторией (ФТ) динамической системы, состояние которой описывается функцией $f(t)$, понимается линия, отображаемая на плоскости в декартовой системе координат, при движении точки с координатами $x = f(t)$ и $y = f'(t)$, где $f'(t)$ обозначает производную функции $f(t)$. Фазовый портрет (ФП) – это совокупность фазовых траекторий. Метод фазовых траекторий и фазовых портретов позволяет визуально наблюдать поведение динамической системы и обнаруживать характерные точки. Используем аналогичный подход для анализа процессов, происходящих в проточной части ГТД при микроволновых измерениях. В качестве координат для построения ФТ и ФП будем использовать квадратурные сигналы $S_i(t), S_q(t)$.

Подход, основанный на анализе фазовых портретов, имеет ряд преимуществ по сравнению с анализом временных разверток сигналов. Во-первых, для стационарных процессов, когда геометрические параметры модели не меняются, фазовый портрет не зависит от масштаба времени. Это значит, что ни изменение частоты вращения, ни изменение частоты дискретизации, не приводят к изменениям фазовых траекторий. И только изменение геометрии модели, сказывается на изменении фазового портрета. Во-вторых, фазовый портрет не требует точной привязки к периоду вращения. Достаточно того, чтобы выполнялось условие, что длина временного отрезка, по которому строится ФП, больше периода вращения. В-третьих, при наложении фазовых портретов, взятых в разные отрезки времени без какой либо привязки к периоду вращения, сразу видны отличия и отклонения траекторий, что позволяет подвергнуть анализу конкретный участок ФП и идентифицировать эти изменения с точки зрения изменения геометрии. В-четвертых, при равномерной временной дискретизации отсчетов сигнала и построении ФП по дискретным отсчетам, можно наблюдать на ФП участки с разной степенью плотности расположения точек. Более плотные участки характеризуют положение ротора в моменты времени, когда фазовые соотношения меняются незначительно, позволяют определить характерные точки на ФП и идентифицировать положение лопатки без дополнительной временной привязки.

Для анализа фазовых портретов можно использовать методы схожие с методами обработки изображения. Пусть фазовый портрет описывается множеством траекторий S . Изменения фазового портрета могут быть описаны операторами линейного и нелинейного преобразований

$$S_{LT} = F \bullet S;$$

$$S_{NLT} = \Phi(S),$$

где S_{LT}, S_{NLT} – преобразованные ФТ; $F, \Phi(\cdot)$ – операторы линейного и нелинейного преобразований.

Линейное преобразование описывается операциями смещения, поворота и масштабирования. Параметры этих преобразований достаточно легко идентифицируются и оцениваются. Процедура нелинейного преобразования является довольно сложной для параметрической идентификации, поэтому вместо нелинейного преобразования, можно предложить использование линейных преобразований для разных участков ФП. В этом случае идентификация и оценивание изменений геометрических параметров сводится к оцениванию параметров линейных преобразований для разных участков ФП.

Поясним это более подробно на простых при-

мерах. Для этого воспользуемся упрощенным методом, основанным на точечной модели описания элементов ГТД и изложенным в [5].

На рис. 2 приведены фазовые портреты, полученные при упрощенном математическом моделировании микроволновой системы измерения зазоров в ТВД при изменении зазора за счет изменения диаметра корпуса. Кривая 1 – ФП для исходного состояния. Кривая 2 – ФП при уменьшении зазора на 0,25 мм. На кривой 1 нанесены точки с равномерным шагом кантования по времени. Здесь хорошо видны места группирования точек, которые являются характерными точками ФП.

Кривая 3 – это ФП, полученный одним общим линейным преобразованием исходного портрета с углом поворота на 20,5 градуса. При пересчете такой угол поворота, соответствует изменению зазора на 0,248 мм, что практически совпадает с реальным изменением зазора в модели. Таким образом, изменение зазора, вызванное изменением размера корпуса, приводит к повороту всего портрета на угол пропорциональный величине зазора.

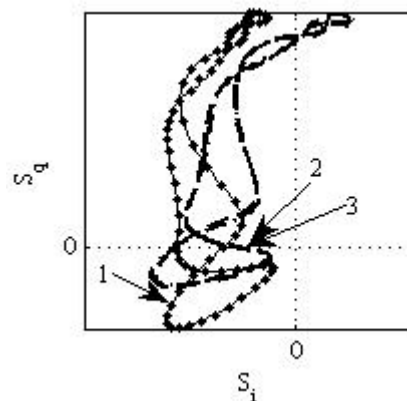


Рис. 2. Изменение ФП при увеличении зазора за счет уменьшения радиуса корпуса на 0,25 мм

На рис. 3 приведены аналогичные фазовые портреты, полученные при имитации удлинения пера лопатки на 0,25 мм. Исходный ФП (кривая 1) такой же, как и на предыдущем графике. Портрет, полученный при удлинении лопатки (кривая 2), наиболее сильно отличается на участке, соответствующем моменту прохождения лопатки вблизи антенны (выделено эллипсом). На некоторых других участках наблюдается полное совпадение ФТ с исходным ФП. Разбиение всего ФП на отдельные участки и анализ преобразований для каждого участка позволил найти такие преобразования, в результате которых наблюдается точное совпадение преобразованного портрета (кривая 3), с портретом, полученным путем моделирования при изменении зазора (кривая 2). Угол поворота выделенного участка составляет 20,1 градуса (соответствует изменению расстояния на 0,243 мм), что с достаточно высокой

точностью совпадает с изменением зазора в модели.

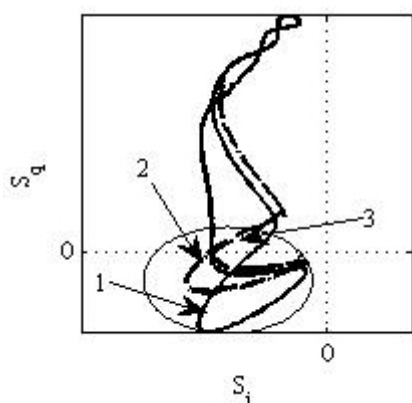


Рис. 3. Изменение ФП при уменьшении зазора за счет удлинения пера лопатки на 0,25 мм

Для примера влияния других явлений, происходящих в проточной части ГТД, на рис. 4 приведены портреты при осевом смещении на 0,5 мм (кривая 1 – исходный портрет, кривая 2 – портрет при осевом смещении, кривая 3 – портрет, полученный линейными преобразованиями исходного портрета (практически совпадает с кривой 2)).

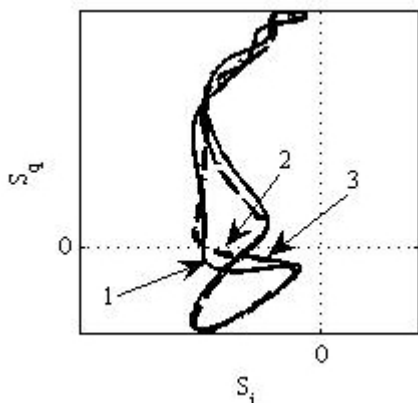


Рис. 4. Изменение ФП при осевом смещении

Сравнение этих портретов с портретами на рис. 2 и 3 показывает, что осевое смещение проявляется в других преобразованиях (на других участках). Поэтому теоретически становится возможным обнаружить и измерить величину осевого смещения. Но для этого нужно предварительно проводить обучение алгоритма обработки, с использованием либо экспериментально полученной информации, либо результатов электродинамического моделирования полностью описанной проточной части.

3. Использование фазовых портретов в реальных экспериментах

Предложенный подход, основанный на построении и анализе фазовых портретов, был использован при проведении практических стендовых испытаний авиационного ГТД.

На рис. 5 приведены графики изменения частоты вращения (рис. 5, а, сплошная линия) при кратковременном скачке и семейство фазовых портретов (рис. 5, б), соответствующих участку, выделенному жирной линией на рис. 5, а. На рис. 5, а пунктирной линией изображена зависимость угла поворота участка ФП, соответствующего моменту прохождения лопатки. Этот угол линейно связан с величиной зазора.

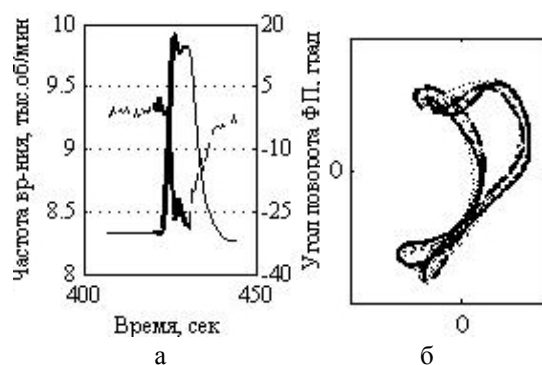


Рис. 5. Диаграммы изменения частоты вращения и угла поворота участка ФП (а) и семейство ФП (б) при скачке частоты вращения

На рис. 6 приведены аналогичные кривые для режима постоянного увеличения частоты вращения. Здесь хорошо видны отличия от кривых рис. 5. В данном случае происходит вращение всего портрета. Но и в этом случае информация о зазоре содержится в угле поворота кончика портрета (участка, соответствующего моменту прохождения лопатки вблизи антенны).

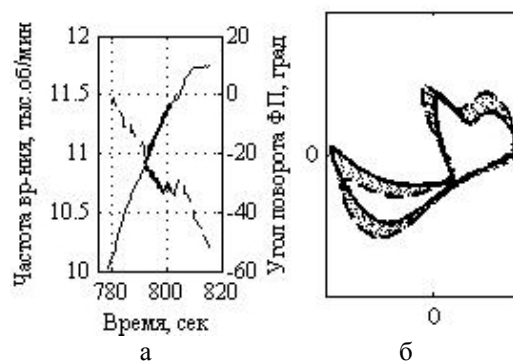


Рис. 6. Диаграммы изменения частоты вращения и угла поворота всего ФП (а) и семейство ФП (б) при увеличении частоты вращения

Таким образом, показано, что любые процессы затрагивающие, изменения геометрических размеров элементов проточной части ГТД, отражаются на изменении фазового портрета, полученного при микроволновых измерениях. Для простого измерения зазоров достаточно определить угол вращения участка, соответствующего моменту прохождения лопатки.

Заключение

Предложенный подход, основанный на анализе фазового портрета, получаемого при микроволновых измерениях зазоров, позволяет более полно проанализировать процессы, происходящие в проточной части ГТД. Классификация процессов и измерение параметров могут быть осуществлены путем оценивания параметров линейных преобразований фазовых портретов.

Литература

1. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 2008. – 284 с.

2. GP7200: Quiet Power for the A380. Engine Yearbook 2003. Aviation Industry Press, 2003.

3. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1976. – Т. 1. – 455 с.

4. Масловский А.В. Принципы построения и практика применения микроволновых систем измерения радиальных зазоров / А.В. Масловский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 8 (65). – С. 205 – 209.

5. Масловский А.В. Применение метода фазовых портретов в микроволновых системах измерения радиальных зазоров лопаточных машин / А.В. Масловский, И.С. Табачук, М.Г. Бакулин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 208 – 212.

Поступила в редакцию 31.05.2011

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

ІНФОРМАТИВНІСТЬ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ПРИ МІКРОХВИЛЬОВИХ ВІМІРАХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

О.В. Масловський, М.Г. Бакулін

Розглянуто новий спосіб дослідження процесів, що відбуваються в проточній частині газотурбінних двигунів. Запропонований спосіб заснований на побудові та аналізі фазового портрету сигналу в мікрохвильовій системі виміру радіальних зазорів. На прикладі простої моделі показано, що зміна геометричних параметрів елементів проточної частини газотурбінного двигуна призводить до різних змін фазового портрету. Аналіз фазового портрету дозволяє виявляти ці зміни, вимірювати їх і розділити внесок різних складових на зміну одного і того ж параметра. Наприклад, визначити складову зміни зазору, викликану подовженням лопатки, і складову, викликану зміною розміру корпусу. Наводяться результати практичного використання даного методу при стендових випробуваннях авіаційного газотурбінного двигуна.

Ключові слова: радіальний зазор, роторні лопатки, подовження лопатки, осьовий зсув, фазовий портрет.

DESCRIPTIVENESS PHASE PORTRAIT FOR MICROWAVE MEASUREMENTS OF GEOMETRIC PARAMETERS AIR-GAS CHANNEL OF GAS TURBINE ENGINES

A.V. Maslovskiy, M.G. Bakulin

A new method for studying the processes occurring in the flow of gas turbine engines. The proposed method is based on the construction and analysis of the phase portrait of the signal in a microwave system for measuring radial clearance. A simple model shows that the change of geometric parameters of the elements flowing part of the gas turbine engine results in various changes in the phase portrait. Analysis of the phase portrait can detect these changes, measure them and divide the contribution of different components to modify the same parameter. For example, to determine the component of the change of the gap caused by the lengthening of the shovels, and the component caused by changes in body size. The results of the practical use of this method for bench tests of aircraft gas turbine engine.

Key words: radial clearance, rotor blades, blade elongation, axial displacement, the phase portrait.

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

Бакулин Михаил Германович – канд. техн. наук, начальник отдела информационных технологий, ООО «Радарные технологии -2Т», Москва, Россия, e-mail: bakulin@info2t.ru.