

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ОБЛАСТИ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЗАЗОРОВ ЛОПАТОЧНЫХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются современные методы бесконтактной диагностики изделий. Предмет исследования – диагностика динамических давлений газовых потоков вблизи периферийных торцов лопаточного колеса турбомшины. Цель работы – анализ методов диагностики параметров турбомашин и разработка конструкции датчика динамических давлений.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием оптических характеристик волоконных брэгговских решеток.

Результаты. Проведен анализ бесконтактных методов диагностики, выявлен наиболее актуальный в настоящее время метод, основанный на отражающих свойствах оптического волокна. Предложена конструкция датчика динамических давлений.

Выводы. Исходя из анализа первичных преобразователей диагностики динамических давлений газовых потоков в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин был выбран датчик на оптоволокне с решетками Брэгга.

Ключевые слова: оптоволокно, динамическое давление, бесконтактные методы измерения, волоконные решетки Брэгга.

A. I. Danilin, Ya. A. Ivanova

DIAGNOSTIC METHODS OF GAS FLOWS' DYNAMIC PRESSURE IN THE PERIPHERAL GAPES OF TURBO MACHINES

Abstract.

Background. Object of research are modern methods of non-contact product diagnostics. The subject of research is a diagnostics of dynamic pressure gas flows near the peripheral ends of the bladed wheel of a turbomachine. The purpose of the work is the analysis of methods for diagnosing the parameters of turbomachines and the development of the design of a dynamic pressure sensor.

Materials and methods. The studies were carried out using the optical characteristics of fiber Bragg gratings.

Results. An analysis of non-contact diagnostic methods is carried out, the most relevant method based on the reflective properties of the optical fiber is identified. Proposed dynamic pressure sensor design.

Conclusions. Based on the analysis to diagnose the dynamic pressure gas streams in the area of the peripheral gap turbomachinery blade wheel sensor has been selected from fiber Bragg gratings.

Keywords: fiber, dynamic pressure, non-contact measurement methods, the fiber Bragg grating.

Введение

Для сокращения числа отказов, а также с целью повышения работоспособности турбомашин большое внимание уделяется контролю динамических параметров в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин, в том числе газотурбинных двигателей (ГТД) [1].

В рамках статьи обозначим основные исследуемые параметры: радиальные зазоры между лопатками ротора и поверхностью корпуса турбомшины; статические и динамические перемещения лопаток компрессора; динамические давления газовых потоков.

Диагностика в большинстве случаев проводится с помощью методов неразрушающего контроля, что позволяет осуществлять контроль исследуемых параметров в процессе эксплуатации турбомшины. Рассмотрим основные методы, применяемые для диагностики параметров в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин.

1. Контроль радиальных зазоров между лопатками ротора и поверхностью корпуса турбомшины

В процессе эксплуатации ГТД на различных режимах работы и при переходе с одного режима на другой радиальные зазоры (РЗ) между периферийными торцами лопаток ротора и внутренней поверхностью корпуса ГТД изменяются. Эффективная система управления радиальными зазорами позволяет избежать аварийных ситуаций [2]. Для измерения РЗ используются как контактные, так и бесконтактные методы измерения.

Контактный метод представлен в виде различных щупов и конструкций, которые стачиваются при взаимодействии с торцами лопаток. На смену контактными датчикам измерения зазоров пришли бесконтактные: вихретоковые, основанные на одном преобразователе [3] или на двух, включенных дифференциально, преобразователях [4]; емкостные, основанные на изменении емкостного сопротивления соединения между двумя электродами датчика при прохождении лопатками области обнаружения [5], акустические [6], индуктивные и оптоэлектронные.

2. Контроль колебательных перемещений лопаток

Измерение колебательных перемещений лопаток осевых компрессоров авиационных двигателей необходимо, так как в процессе эксплуатации на лопатки воздействуют большие статические и переменные аэродинамические силы. Сильные колебания могут приводить к образованию трещин в лопатках компрессора и, в конечном счете, к выходу их из строя, что в результате может привести к полному отказу турбинного силового агрегата [7].

Для измерения вибраций лопаток в большинстве случаев так же, как и для измерения РЗ, используются бесконтактные датчики, такие как оптические, вихретоковые и емкостные. Измерение колебаний может осуществля-

ся путем определения разности между статической и динамической составляющими движения лопатки [8], а также путем вычислений, основанных на обнаружении опорной и дополнительной фазовых меток на вращающемся элементе [9].

3. Контроль динамических давлений воздушного потока

Измерение динамических давлений воздушного потока турбомашин является наименее исследованной областью в настоящее время. Использование датчиков давления позволит описать характер движения и завихренность воздушного потока вблизи периферийных кромок лопаток компрессора. В свою очередь, имея представление о величине и характере динамического движения воздушных масс в области периферийных зазоров лопаток, можно говорить о деформации лопаток.

Исходя из вышеперечисленных методов, можно выделить основные методы измерения параметров в области периферийных зазоров лопаток турбоагрегатов (рис. 1).



Рис. 1. Основные методы диагностики исследуемых параметров периферийных областей лопаток турбоагрегатов

Методы, используемые для измерения исследуемых параметров в области периферийных зазоров лопаток турбомашин, должны позволять производить измерения с минимальными погрешностями в экстремальных условиях, таких как повышенная температура и сильные вибрации. Наиболее распространены в настоящее время датчики, в основе которых лежат отражающие свойства оптоволоконна.

Датчики на основе волоконных световодов находят применение в таких отраслях промышленности, как электроэнергетика, топливная промышленность, черная и цветная металлургия, химическая и нефтедобывающая промышленность, машиностроение и промышленность строительных материалов. Широкое распространение они нашли ввиду ряда преимуществ:

- 1) широкополосность;
- 2) малый диаметр;
- 3) механическая прочность;
- 4) устойчивость к электрическим и магнитным помехам;

- 5) взрывобезопасность;
- 6) высокая коррозионная стойкость.

Одним из перспективных вариантов волоконно-оптических датчиков при исследовании механических изменений того или иного материала или газоздушного потока являются датчики с использованием в качестве чувствительного элемента волоконной брэгговской решетки (ВБР), обладающей свойством отражения излучения от решетки на определенной длине волны. Деформация (растяжение или сжатие) ВБР приводит к изменению ее периода и, следовательно, к изменению спектральных свойств излучения, отраженного от решетки.

Датчики на ВБР уже давно нашли свое применение в области измерения давления жидкостей и газов. Так, в работе [10] волоконно-оптический датчик давления (ВОДД) состоит из последовательно записанных на световоде двух ВБР, одна из которых может выполнять функцию термокомпенсации, а другая ВБР воспринимать нагрузку деформации мембраны, при этом мембрана жестко прикреплена к световоду. Конструкция ВОДД с двумя ВБР приведена на рис. 2.

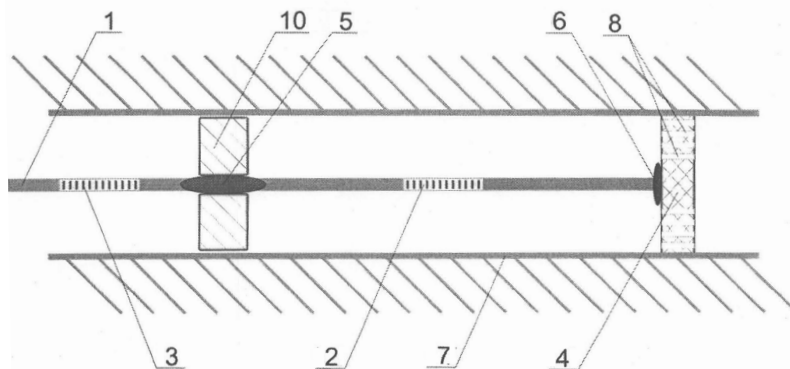


Рис. 2. Конструкция ВОДД с двумя ВБР: 1 – световод; 2 – ВБР нагрузки, 3 – ВБР термокомпенсации; 4 – мембрана; 5 и 6 – места соединения световода с корпусом и мембраной; 7 – корпус; 8 – отверстия для передачи внешнего давления; 10 – мембрана

В работе Гафнера В. А. и Смирнова И. И. волоконно-оптический датчик давления также построен на волокне с двумя решетками Брэгга в качестве чувствительного элемента. Первый участок оптического волокна с решеткой Брэгга расположен между стойками, а второй участок оптического волокна с решеткой Брэгга расположен с обратной стороны стойки. Данная конструкция обусловлена повышением точности измерения [11].

Аналогично, в устройстве для измерения давления и температуры в потоке газа и/или жидкости и стенде для испытания и измерения характеристик работы газотурбинного двигателя используется волоконно-оптический датчик с мембраной, приведенный на рис. 3 [12]. На основе изученной информации на рис. 4 представлена модель датчика динамических давлений.

Датчик включает в себя два волоконных световода, в которых расположены решетки Брэгга. Под действием воздушных масс мембрана оказывает

давление на ВБР1 первого световода, что приводит к изменению сигнала, отраженного от решетки. Помимо этого, на ВБР1 воздействует температура корпуса компрессора, т.е. выходной сигнал зависит как от деформации ВБР, так и от температуры среды.

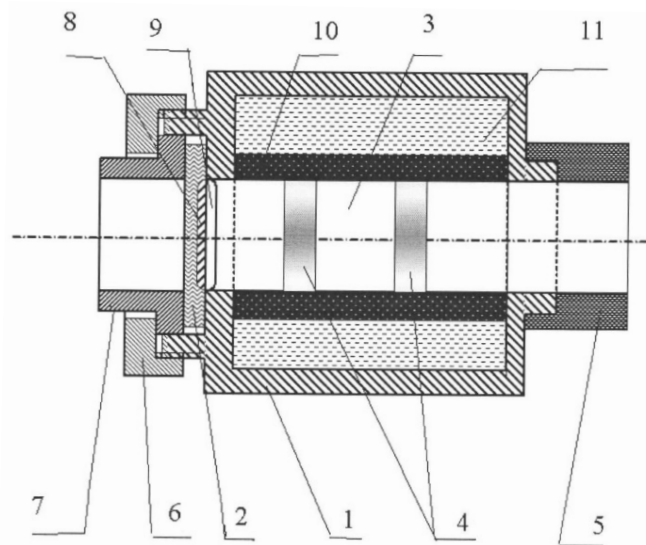


Рис. 3. Устройство для измерения давления и температуры на волоконно-оптическом датчике: 1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – световод; 4 – брэгговская решетка; 5 – приемно-передающий кабель; 6 – накидная гайка; 7 – напорное устройство; 8 – структура с поверхностным рельефом; 9 – выемка; 10 – защитное покрытие; 11 – жидкость или гель

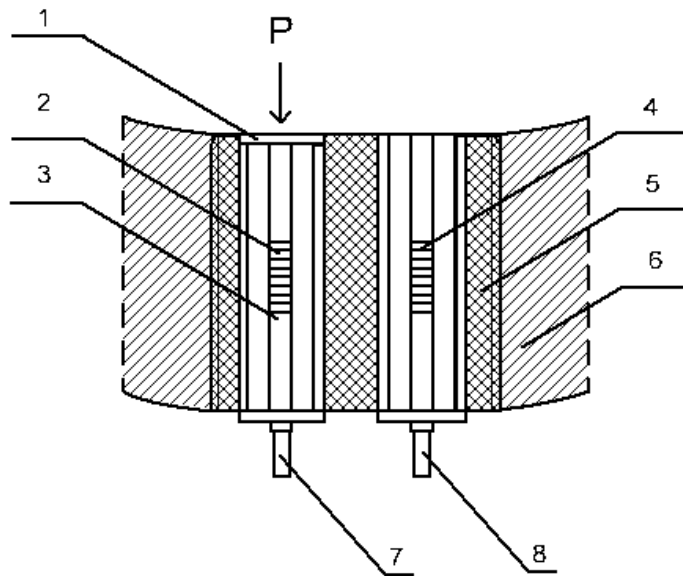


Рис. 4. Датчик динамических давлений: 1 – упругая мембрана; 2 – ВБР1; 3 – сердцевина волоконного световода; 4 – ВБР2; 5 – корпус датчика; 6 – корпус компрессора; 7, 8 – выходы для подключения к интеррогатору

Для того чтобы выходной сигнал давал представление только о давлении воздушных масс, в корпусе датчика расположен еще один волоконный световод с ВБР2, сигнал на выходе которого является эталонным. На ВБР2 воздействует только температура корпуса компрессора. Сигналы со световодов поступают на два входа интеррогатора и на выходе измерительной системы фиксируется разностный сигнал со световодов. Данная структура датчика позволяет измерить давление воздушных масс без погрешности измерения за счет изменения температуры корпуса.

Заключение

Таким образом, использование оптических свойств волокна с брэгговскими решетками на данный момент является одним из наиболее актуальных и перспективных методов измерения давления за счет возможности проводить измерения в тяжелых окружающих условиях и без влияния электрических помех. Именно поэтому датчик с применением волоконных световодов выбран для дальнейшего изучения характера изменения воздушного потока в периферийной области турбомашин.

Библиографический список

1. Данилин, А. И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами / А. И. Данилин. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008. – С. 189–198.
2. Патент 2018104931 Российская Федерация. Автоматическое устройство термомеханического управления радиальным зазором между концами рабочих лопаток ротора и статора компрессора или турбины двухконтурного газотурбинного двигателя / Эскин И. Д., Старцев Н. И., Фалалеев С. В. – № 2684073 ; заявл. 08.02.2018 ; опубл. 03.04.2019, Бюл. № 10.
3. Патент 2014154334/28 Российская Федерация. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомашин / Белоухов В. Н., Подлипов П. Е., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. – № 2587644 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17.
4. Патент 2016132350 Российская Федерация. Способ измерения радиального зазора между торцами рабочих лопаток и статором газотурбинного двигателя / Боровик С. Ю., Коршиков И. Г., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. – № 2648284 ; заявл. 04.08.2016 ; опубл. 23.03.2018, Бюл. № 9.
5. Патент 2013139738/06 Российская Федерация. Вентилятор или компрессор турбомашин / Бюйль Ф. Ш., Леру А., Турэн Д., Ляннере К., Сарнаго Ф., Бернар С. – № 2585154 ; заявл. 25.01.2012 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 15.
6. Патент 2015124042 Российская Федерация. Способ измерения расстояния и устройство измерения расстояния / Мюллер А., Полески П., Трич К., Войчек Р.-Д. – № 2691135 ; 19.06.2015 ; опубл. 11.06.2019, Бюл. № 17.
7. Патент 2009127647/28 Российская Федерация. Устройство и способ бесконтактного измерения вибрации лопаток / Цилински М., Циглер Г. – № 2465562 ; заявл. 12.12.2007 ; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 30.
8. Патент 2017117278 Российская Федерация. Способ и устройство мониторинга лопаточного колеса авиационного двигателя посредством измерения положения равновесия / Жере В., Ник Ж. – № 2686654 ; заявл. 15.10.2015 ; опубл. 29.04.2019, Бюл. № 13.
9. Патент 2015108301/28 Российская Федерация. Емкостной инерционный датчик давления, способ его сборки и способ измерения давления / Казарян А. А. – № 2589494 ; заявл. 11.03.2015 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19.

10. Патент 2012125667/28 Российская Федерация. Волоконно-оптический торцевой датчик давления (его варианты) / Симонов М. А., Дельнов С. В., Заренбин А. В. – № 2522791 ; заявл. 20.06.2012 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
11. Патент 2016144114 Российская Федерация. Волоконно-оптический датчик давления / Гафнер В. А., Смирнов И. И. – № 2628734 ; заявл. 09.11.2016 ; опубл. 21.08.2017, Бюл. № 24.
12. Патент 2014122444/28 Российская Федерация. Устройство для измерения давления и температуры в потоке газа и/или жидкости и стенд для испытания и измерения характеристик работы газотурбинного двигателя / Давыдова Л. Н., Еричев Д. Ю., Замышляев А. Н., Самсонов В. М. – № 2567470 ; заявл. 03.06.2014 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.

References

1. Danilin A. I. *Beskontaktnye izmereniya deformatsionnykh parametrov lopatok v sistemakh kontrolya i upravleniya turboagregatami* [Non-contact measurements of the deformation parameters of the blades in control systems and control of turbine units]. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2008, pp. 189–198. [In Russian]
2. Patent 2018104931 Russian Federation. *Avtomaticheskoe ustroystvo termomekhanicheskogo upravleniya radial'nyim zazorom mezhdu kotsami rabochikh lopatok rotora i statora kompressora ili turbiny dvukhkoturnogo gazoturbinnogo dvigatelya* [Automatic device for thermomechanical control of the radial clearance between the ends of the rotor blades and the stator of a compressor or a turbine of a double-circuit gas turbine engine]. Eskin I. D., Startsev N. I., Falaleev S. V. No. 2684073; appl. 08.02.2018; publ. 03.04.2019, bull. no. 10. [In Russian]
3. Patent 2014154334/28 Russian Federation. *Sposob izmereniya radial'nykh zazorov mezhdu tortsami lopatok rabocheho kolea i statornoy obolochkoy turbo-mashiny* [The method of measuring radial clearances between the ends of the impeller vanes and the stator shell of a turbo machine]. Belopukhov V. N., Podlipnov P. E., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. No. 2587644; appl. 30.12.2014; publ. 20.06.2016, bull. no. 17. [In Russian]
4. Patent 2016132350 Russian Federation. *Sposob izmereniya radial'nogo zazora mezhdu tortsami rabochikh lopatok i statorom gazoturbinnogo dvigatelya* [The method of measuring the radial clearance between the ends of the blades and the stator of a gas turbine engine]. Borovik S. Yu., Korshikov I. G., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. No. 2648284; appl. 04.08.2016; publ. 23.03.2018, bull. no. 9. [In Russian]
5. Patent 2013139738/06 Russian Federation. *Ventilyator ili kompressor turbomashiny* [Turbomachine fan or compressor]. Byuyul' F. Sh., Leru A., Turen D., Lyannere K., Sarnago F., Bernar S. No. 2585154; appl. 25.01.2012; publ. 10.03.2015, bull. no. 15. [In Russian]
6. Patent 2015124042 Russian Federation. *Sposob izmereniya rasstoyaniya i ustroystvo izmereniya rasstoyaniya* [The method of measuring distance and a device for measuring distance]. Myuller A., Poleski P., Trich K., Voychek R.-D. No. 2691135; 19.06.2015; publ. 11.06.2019, bull. no. 17. [In Russian]
7. Patent 2009127647/28 Russian Federation. *Ustroystvo i sposob beskontaktnogo izmereniya vibratsii lopatok* [Device and method for non-contact measurement of blade vibration]. Tsilinski M., Tsigler G. No. 2465562; appl. 12.12.2007; publ. 27.01.2011, bull. no. 30. [In Russian]
8. Patent 2017117278 Russian Federation. *Sposob i ustroystvo monitoringa lopatochnogo kolea aviatsionnogo dvigatelya posredstvom izmereniya polozheniya ravnovesiya* [Method and device for monitoring the blade wheel of an aircraft engine by measuring the equilibrium position]. Zhere V., Nik Zh. No. 2686654; appl. 15.10.2015; publ. 29.04.2019, bull. no. 13. [In Russian]

9. Patent 2015108301/28 Russian Federation. *Emkostnoy inertsiionnyy datchik davleniya, sposob ego sborki i sposob izmereniya davleniya* [Capacitive inertial pressure sensor, method of assembly and method for measuring pressure]. Kazaryan A. A. No. 2589494; appl. 11.03.2015; publ. 10.07.2016, bull. no. 19. [In Russian]
10. Patent 2012125667/28 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy tortsevoy datchik davleniya (ego varianty)* [Fiber optic end pressure sensor (its variants)]. Simonov M. A., Del'nov S. V., Zarenbin A. V. No. 2522791; appl. 20.06.2012; publ. 20.07.2014, bull. no. 20. [In Russian]
11. Patent 2016144114 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy datchik davleniya* [Fiber optic pressure sensor]. Gafner V. A., Smirnov I. I. No. 2628734; appl. 09.11.2016; publ. 21.08.2017, bull. no. 24. [In Russian]
12. Patent 2014122444/28 Russian Federation. *Ustroystvo dlya izmereniya davleniya i temperatury v potoke gaza i/ili zhidkosti i stend dlya ispytaniya i izmereniya kharakteristik raboty gazoturbinного dvigatelya* [The device for measuring pressure and temperature in a gas and/or liquid flow and the stand for testing and measuring the performance of a gas turbine engine]. Davydova L. N., Elichev D. Yu., Zamyshlyayev A. N., Samsonov V. M. No. 2567470; appl. 03.06.2014; publ. 10.11.2015, bull. no. 31. [In Russian]

Данилин Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой радиотехники,
Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева (Россия,
г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: aidan@ssau.ru

Danilin Aleksandr Ivanovich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of radio engineering, Samara National
Research University (34, Moskovskoye
highway, Samara, Russia)

Иванова Яна Александровна

аспирант, Самарский
национальный исследовательский
университет имени академика
С. П. Королева (Россия, г. Самара,
ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: ivanova.yaa@ssau.ru

Ivanova Yana Aleksandrovna

Postgraduate student, Samara National
Research University (34, Moskovskoye
highway, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Данилин, А. И. Методы диагностики динамических давлений газовых потоков в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин / А. И. Данилин, Я. А. Иванова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 28–35. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-3.