

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 629.703:658.652:629.701+533.6
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.145-150

Дата поступления: 19.09.2019
Дата принятия: 02.10.2019

Восстановление параметров акустических полей, измеренных волоконной многосенсорной системой, на срезе сопла турбомашин

В.Ю. Виноградов, В.И. Анфиногентов

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

Статья посвящена разработке и исследованию распределенных волоконных систем аэроакустического контроля параметров газовоздушного потока на срезе сопла турбомашин. Рассмотрена задача локализации источников и восстановления акустического поля турбомашин. Рассмотрено управление аэроакустической системой контроля на основе волоконнооптических датчиков основанное на принципах самообучения, так как экстремальные регуляторы, хотя и просто технически реализуются, однако обладают низким быстродействием, что особенно сказывается при большом числе управляющих элементов.

Ключевые слова: распределенные волоконные системы, аэроакустический контроль, акустическое поле, моделирование процессов, восстановление.

Введение

На практике контроль и измерение пространственных распределений акустических полей на основе волоконно-оптических датчиков различной физической природы осуществляют путем регистрации сигналов от датчиков, размещаемых в совокупности точек контроля [1; 2]. Подобные системы контроля будем называть многоточечными, хотя они могут состоять и из одного датчика, перемещаемого по точкам контроля. Рассмотрим задачу размещения точек контроля и задачу восстановления пространственного распределения поля по измерениям по конечной совокупности точек в отдельности.

Распределенные волоконно-оптические датчики, обеспечивают много преимуществ такие, как высокую чувствительность к изменению физических полей и нечувствительность к электромагнитной интерференции, возможность удаленного зондирования, низкая стоимость и размеры, также их можно использовать в агрессивных средах. Эти преимущества дают основания для применения оптического волокна при использовании его в качестве контролирующего датчика для аэроакустических измерений на срезе сопла турбомашин и ГТД [3–6].

Одним из определяющих факторов при решении этой задачи является выбор схемы укладки

измерительных линий (рис. 1). Из известных равномерных укладок нами выбраны горизонтально-вертикальная и диагональная укладки соответственно для прямоугольного и круглого сопла, как показано в правой части рис. 1.

Для прямоугольных и круглых сопел турбомашин схемам укладки оптических сенсорных волокон, приведенным на рис. 1, присуща «большая ракурсность», то есть множественность числа направлений наблюдений p . Известно [7–10], что в случае полных данных $p = 360$, то есть когда известны достаточно качественные проекции по всем 360 ракурсам углового диапазона, могут быть получены реконструкции хорошего качества. Для сравнения в медицинской или промышленной томографии для получения качественных изображений необходимо число ракурсов $p = 102–103$, а для их анализа используются аналитические методы решения уравнений. Поэтому в нашем случае, при значительно превышающей ракурсности стандартные аналитические методы неприемлемы, необходимо решение оптимизации и выбор количества устанавливаемых датчиков.

Так как размещаемые в плоскости среза сопла турбомашин (или иного технического устройства) волоконно-оптические датчики контроля акустического поля могут привести к искажению формы самого поля, это неизбежно приведет и к искажению поля давления. Следовательно, возникнет

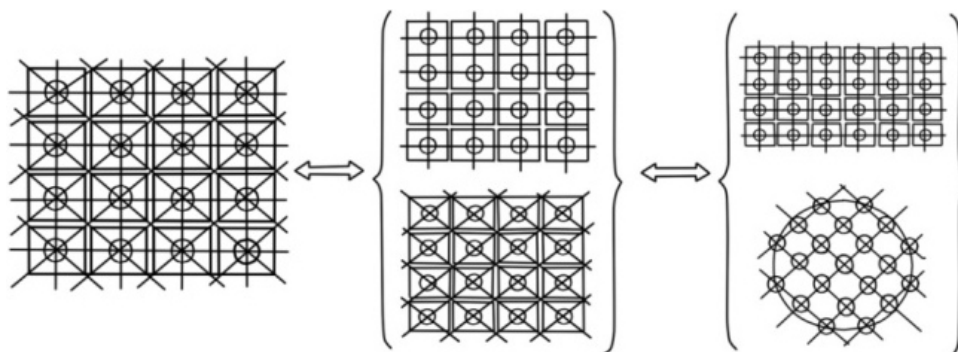


Рис. 1. Выбор схемы укладки измерительных линий волоконно-оптических датчиков для сопел турбомашин прямоугольной и круглой конфигурации

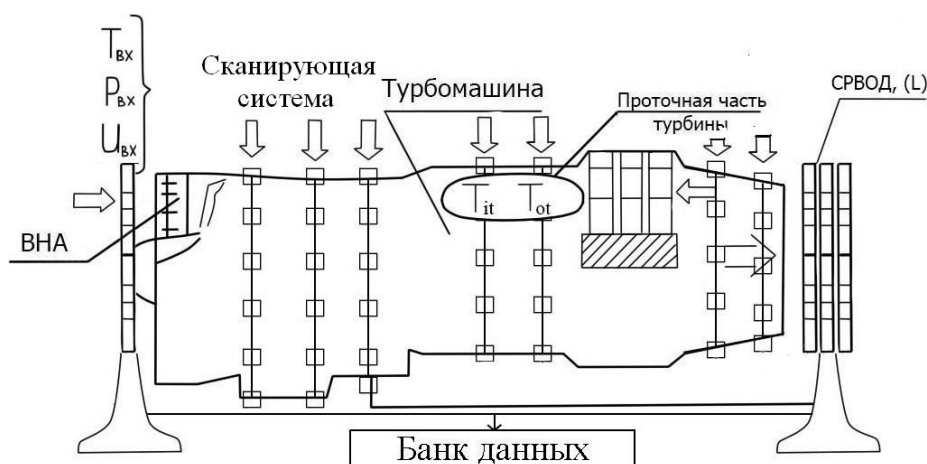


Рис. 2. Автоматизированное диагностическое устройство окружного и построчного контроля акустических параметров на срезе сопла ГТД (СРВОД – система распределенных волоконно-оптических датчиков в соответствии с укладкой по рис. 1)

кает задача размещения минимально возможного числа датчиков контроля для получения заданной точности контроля акустического поля. При этом под контролем будем понимать создание текущего состояния акустического поля в виде непрерывных функций пространственных координат. С этой задачей тесно связана задача осуществления максимально достоверного контроля полей при ограниченном числе датчиков.

Решение задач

Выбирая определенное число точек контроля на периоде самой высокочастотной компоненты в спектре акустического поля, получим общее количество контрольных точек. Однако данный подход к выбору контрольных точек может привести к тому, что общее число точек контроля будет недопустимо большим. В данном разделе для выбора точек контроля предлагаются подходы, основанные на учете более полной априорной информации о подлежащих контролю полях.

Измерительная часть, включающая датчики и блок измерения, предназначена для контроля акустического давления в плоскости среза сопла тур-

бомашины или иного технического устройства. Присущие этой плоскости среза сопла размеры и особенности источников возбуждения акустического поля определяют некоторые устойчивые признаки подлежащих контролю полей, что может быть использовано при проектировании системы контроля этих полей, которая представлена на рис. 2.

На каждом цикле измерений поля описываются детерминированными, но заранее неизвестными функциями пространственных координат, изменяющимися от одного цикла измерения к другому. В связи с этим, функцию $T(\vec{x})$, описывающую зависимость, например, акустического поля от пространственных координат, будем считать реализацией из некоторого статистического ансамбля функций [11].

Изложим предлагаемый подход к проектированию системы контроля для акустического поля.

Зададимся достаточно большим числом базисных функций $T_i(\vec{x})$ по различным ракурсам i [12].

Тогда любую реализацию акустического поля по пространственным координатам можно представить с требуемой точностью в виде разложения по базисным функциям:

$$T(\bar{x}) = \sum_{i=1}^I \alpha_i T_i(\bar{x}), \quad (1)$$

где α_i – коэффициенты, имеющие случайный характер и однозначно определяющие конкретную реализацию акустического поля.

Их статистические характеристики могут быть определены, например, путем цифрового моделирования или экспериментального измерения в лабораторных условиях достаточно полного набора реализаций акустического поля. В дальнейшем предполагается, что α_i – центрированные случайные величины, распределенные по нормальному закону с заданной матрицей корреляции R .

Синтез системы контроля пространственного акустического поля включает две основные задачи: определение координат \bar{x}_m размещения умеренного числа M датчиков и восстановление непрерывной функции $\tilde{T}(\bar{x})$ по измеренным значениям поля в разных точках контроля $T(\bar{x}_1)$, $T(\bar{x}_2)$, ..., $T(\bar{x}_M)$. Восстановление непрерывной реализации акустического поля по значениям в точках контроля сводится к определению по некоторому правилу оценок $\tilde{\alpha}_i$ коэффициентов α_i . Восстановленная реализация поля имеет вид:

$$\tilde{T}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^I \tilde{\alpha}_i T_i(\bar{x}). \quad (2)$$

Точность восстановления акустического поля оценим следующим выражением:

$$\delta^2 = \frac{M \|T(\bar{x}) - \tilde{T}(\bar{x})\|^2}{M \|T(\bar{x})\|^2}, \quad (3)$$

где символом M обозначено усреднение по множеству реализаций подлежащих восстановлению полей.

Если функции $T_1(\bar{x})$, $T_2(\bar{x})$, ..., $T_M(\bar{x})$ образуют ортонормированную систему функций, то величина δ^2 , определяющая близость функций $T(\bar{x})$ и $\tilde{T}(\bar{x})$ совпадает с величиной, характеризующей близость коэффициентов α_i и $\tilde{\alpha}_i$, так как:

$$\begin{aligned} M \|T(\bar{x}) - \tilde{T}(\bar{x})\|^2 &= \\ &= \iiint_{\Omega} M \left| \sum_{i=1}^I \alpha_i T_i(\bar{x}) - \sum_{i=1}^I \tilde{\alpha}_i T_i(\bar{x}) \right|^2 d\bar{x} = \\ &= \sum_{i=1}^I M |\alpha_i - \tilde{\alpha}_i|^2 = M \|\bar{\alpha} - \tilde{\bar{\alpha}}\|^2. \end{aligned}$$

Поэтому точность восстановления акустического поля будем определять выражением:

$$\delta^2 = \frac{M \|\bar{\alpha} - \tilde{\bar{\alpha}}\|^2}{M \|\bar{\alpha}\|^2}. \quad (4)$$

Точность оценки исходного поля зависит от числа и расположения точек контроля \bar{x}_m и от алгоритма определения оценок $\tilde{\alpha}_i$ коэффициентов α_i . Одновременная оптимизация координат точек контроля и алгоритма вычисления оценок представляет трудноразрешимую проблему, поэтому задачи выбора координат точек контроля и алгоритма вычисления оценок $\tilde{\alpha}_i$ коэффициентов α_i будем рассматривать отдельно.

В предположении о том, что известны вероятностные характеристики подлежащих контролю акустических полей, каждой дискретной выборке значений поля в точках контроля может быть поставлено в соответствие количество содержащейся в ней информации. Для нахождения координат точек контроля целесообразно использовать критерий минимума энтропии. Каждой реализации случайного акустического поля $T(\bar{x})$ соответствует значение плотности вероятности, характеризующее частоту появления этой реализации. То есть можно говорить о «более вероятных» и «менее вероятных» реализациях. Имея это в виду, задачу восстановления акустического поля $T(\bar{x})$ по измеренным в точках контроля значениям можно сформулировать следующим образом: среди всех непрерывных функций $\tilde{T}(\bar{x})$, имеющих в точках контроля измеренные значения, найти такую функцию $\tilde{T}(\bar{x})$, для которой значение плотности вероятности $w(\tilde{T}(\bar{x}))$ будет наибольшим.

Восстановление акустического поля по значениям в контрольных точках является задачей интерполяции непрерывной функции по дискретной выборке. Эта задача решается неоднозначно, что объясняется в частности тем, что по значениям функции $T(\bar{x})$ в M точках контроля, т. е. по M уравнениям нужно определить коэффициенты $\tilde{\alpha}_i$, число которых много больше M . Обычный прием состоит в том, что в разложении (1) сохраняют лишь M базисных функций. При этом вопрос о том, какие из базисных функций выбрать, решается интуитивно.

Даже в рамках такого подхода целесообразно использовать информацию о статистике подлежащих контролю акустических полей, например, в излагаемом ниже варианте,

Среди I базисных функций $T_i(\bar{x})$, по которым осуществляется разложение акустического поля $T(\bar{x})$,

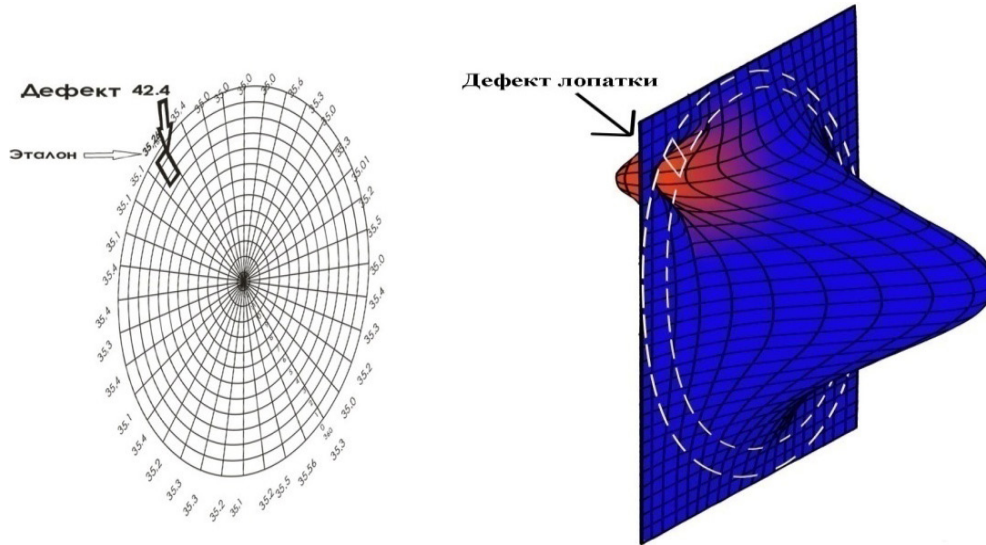


Рис. 3. Результаты визуального представления восстановленного акустического поля с формированием картографического портрета дефекта рабочих лопаток турбомашин в 2D и 3D форматах

выбираются M таких функций, случайные коэффициенты α_i при которых имеют наибольшие дисперсии σ_i^2 , и по результатам измерения акустического поля в дискретном наборе M точек восстанавливаются лишь коэффициенты разложения по выбранным базисным функциям. Таким образом, в данном варианте задача восстановления сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений M -го порядка относительно коэффициентов $\tilde{\alpha}_i$:

$$\sum_{i=1}^M \tilde{\alpha}_i T_{im} = T_m, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

При этом точность восстановления исходного акустического поля по дискретным значениям характеризуется величиной:

$$\varepsilon_1^2 = 1 - \left[\sum_{m=1}^M 2 \left(\sum_{i=1}^M (T^{-1})_{mi} T_{mi} \right) \sigma_m^2 - \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^I \left| \sum_{i=1}^M (T^{-1})_{mi} T_{ji} \right|^2 \sigma_j^2 \right] / \sum_{i=1}^I \sigma_i^2. \quad (6)$$

Однако использовать имеющуюся априорную информацию можно существенно шире, если из условия оптимизации по какому-либо критерию определять все I коэффициентов.

В завершение необходимо еще раз отметить то обстоятельство, что изложенные выше алгоритмы определения пространственного размещения точек контроля и восстановления акустического поля по дискретным отсчетам основаны на априорной информации о статистике подлежащих восстановлению полей [7–10]. Так как каждая аэроакустическая система контроля параметров

турбомашин разрабатывается для всех типов турбомашин сразу, то в реальных ситуациях, не поддающихся аналитическому расчету, должен быть организован эксперимент по воссозданию рабочих режимов возбуждения акустического поля и проведено измерение совокупности реализаций акустического поля $T(\vec{x})$ с помощью универсальной измерительной системы (ВСС) с большим числом датчиков. После чего вычисляются необходимые статистические характеристики: математические ожидания и матрица корреляции.

Получены расчетные зависимости дисперсии и погрешности восстановления акустического поля по данным волоконно-оптических измерений.

Число датчиков, обеспечивающее допустимое значение погрешности восстановления акустического поля $\varepsilon^2 \leq 0.01$ для значений угла α_i равных 15, 45 и 90° от вертикали против часовой стрелки, составляет 3, 6 и 8 соответственно. Значения диагональных элементов матрицы R (дисперсия коэффициентов разложения поля излучения $F(\varphi)$ по функциям $\cos(2n\varphi)$) проводилось при учете лишь десяти членов ряда. Результаты расчетов показали, что наличие корреляции между коэффициентами разложения акустического поля по функциям $\cos(2n\varphi)$ приводит к уменьшению необходимого для достижения заданной точности восстановления числа датчиков. При этом значения дисперсий коэффициентов разложения акустического поля незначительно изменяются при изменении α_i .

Для примера на рис. 3 показана визуализация дефекта с ракурсом по углу 15° против часовой стрелки от вертикали.

Применение методик восстановления параметров акустических полей с использованием данных волоконно-оптических измерений также было успешно использовано при разработке систем мониторинга вибраций [13], эффективных глушителей для ГТД [14], мобильных комплексов аэроакустической картографии [15] и т. д.

Заключение

Предложена структура аэроакустического комплекса в виде системы автоматического контроля акустических параметров газо-воздушного потока на срезе сопла турбомшины в виде различных по форме измерительных линий волоконно-оптического контроля давления в зависимости от формы контролируемых объектов.

Разработаны и представлены методики восстановления акустического поля, создаваемого газоздушным потоком турбомшины, реализуемые по данным измерений на выходе СРВОД, с использованием только статистического подхода.

Восстановление поля представлено в виде непрерывных функций пространственных координат, построенных по результатам измерения в дискретной совокупности точек при наличии априорной информации о свойствах измеряемых акустических полей.

Рассмотрены перспективы применения указанных методик и средств для решения близких задач аэроакустической картографии.

Список литературы

1. Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств // Вестник КГТУ. 1997. № 4. С. 27–31.
2. Витрик О.Б. Проблема «чувствительной кожи» и волоконно-оптические измерительные системы // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 1. С. 108–115.
3. Виноградов В.Ю., Морозов О.Г. Комплексный подход к развитию аэроакустических методов диагностирования проточной части газотурбинных авиационных двигателей // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1–2. С. 474–476.
4. Fiber-optic system for checking the acoustical parameters of gas-turbine engine flow-through passages / V.Yu. Vinogradov [et al.] // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9533. P. 95330K. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2181434>.
5. Аэроакустические методы диагностирования проточной части авиационных двигателей / В.Ю. Виноградов [и др.] // Авиационная промышленность. 2014. № 1. С. 48–52.
6. Аэроакустические взаимодействия в газоздушном тракте авиационных ГТД / В.Ю. Виноградов [и др.] // Авиационная промышленность. 2015. № 3. С. 13–17.
7. Виноградов В.Ю. Метод диагностики проточной части ГТД по акустическим характеристикам газовой струи, измеренным на срезе сопла // Контроль. Диагностика. 1999. № 4. С. 34–37.
8. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А., Тунаков А.П. Диагностирование авиационных ГТД по параметрам, измеренным за срезом сопла // Вестник двигателестроения. 2009. № 3. С. 184–189.
9. Виноградов В.Ю. Теоретический подход к диагностированию авиационных газотурбинных двигателей по параметрам, измеренным за срезом сопла // Контроль. Диагностика. 2010. № 7. С. 56–60.
10. Виноградов В.Ю. Исследование технического состояния авиационных ГТД и энергетических установок с целью составления картограмм газодинамических параметров для диагностики // Контроль. Диагностика. 2011. № 12. С. 44–52.
11. Виноградов В.Ю. Аэроакустическая картография как метод неразрушающего контроля параметров потока на срезе сопла турбомашин с использованием волоконно-оптических технологий. Постановка задачи // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5095>.
12. Виноградов В.Ю., Анфиногентов В.И., Морозов О.Г. Математическое моделирование и восстановление оптико-акустических параметров газоздушного потока на срезе сопла турбомшины. Результаты моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5098>.
13. Microwave photonic polyharmonic probing for fiber optical telecommunication structures and measuring systems sensors monitoring / I.I. Nureev [et al.] // Proc. SPIE. 2018. V. 10774. P. 107741J. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2318738>.
14. A practical approach to the development of aircraft GTE's noise suppression system on the base of fiber optic sensors / V.Yu. Vinogradov [et al.] // Proc. SPIE. 2017. V. 10342. P. 1034219. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2270790>.
15. Виноградов В.Ю., Морозов О.Г., Анфиногентов В.И. Перспективы внедрения мобильных аэроакустических технологий для экологического мониторинга авиационных ГТД // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20. № 3–2. С. 12–16.

References

1. Morozov O.G., Pol'skij Ju.E. Unified Field complexed VOD systems control the security settings of high-speed vehicles. *Vestnik KGTU*, 1997, no. 4, pp. 27–31. [In Russian].
2. Vitrik O.B. The problem of “sensitive skin” and a fiber optical measuring system. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*, 2001, vol. 7, no. 1, pp. 108–115. [In Russian].

3. Vinogradov V.Ju., Morozov O.G. An integrated approach to the development of methods for diagnosing aeroacoustic flow gas turbine aircraft engine parts. *Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 1, pp. 474–476. [In Russian].
4. Vinogradov V.Yu. et al. Fiber-optic system for checking the acoustical parameters of gas-turbine engine flow-through passages. *Proc. SPIE*, 2014, vol. 9533, p. 95330K. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2181434>.
5. Vinogradov V.Ju. et al. Aeroacoustic methods of diagnosing a flowing part of aircraft engines. *Aviatsionnaja promyshlennost'*, 2014, no. 1, pp. 48–52. [In Russian].
6. Vinogradov V.Ju. et al. Aeroacoustic cooperation in the gas path GTE. *Aviatsionnaja promyshlennost'*, 2015, no. 3, pp. 13–17. [In Russian].
7. Vinogradov V.Ju. Method of diagnosing flow part TBG on acoustic characteristics of the gas stream measured at the nozzle exit. *Kontrol'. Diagnostika*, 1999, no. 4, pp. 34–37. [In Russian].
8. Vinogradov V.Ju., Sajfullin A.A., Tunakov A.P. Diagnosing GTE in the parameters measured for the nozzle exit. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2009, no. 3, pp. 184–189. [In Russian].
9. Vinogradov V.Ju. The theoretical approach to the diagnosis of aircraft gas turbine engines in the parameters measured by slice nozzle. *Kontrol'. Diagnostika*, 2010, no. 7, pp. 56–60. [In Russian].
10. Vinogradov V.Ju. Investigation of the technical state of gas turbine engines and power plants with the aim of drawing up cartograms dynamic parameters for the diagnosis. *Kontrol'. Diagnostika*, 2011, no. 12, pp. 44–52. [In Russian].
11. Vinogradov V.Ju. Aeroacoustic cartography as a method of nondestructive testing of the flow parameters at the nozzle exit turbomachinery using fiber optic technology. Formulation of the problem. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, no. 3, URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5095>. [In Russian].
12. Vinogradov V.Ju., Anfinogentov V.I., Morozov O.G. Mathematical modeling and restore the optical-acoustic parameters of the air-gas flow at the nozzle exit turbomachine. The simulation results. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, no. 3. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5098>. [In Russian].
13. Nureev I.I. et al. Microwave photonic polyharmonic probing for fiber optical telecommunication structures and measuring systems sensors monitoring. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10774, p. 107741J. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2318738>.
14. Vinogradov V.Yu. et al. A practical approach to the development of aircraft GTE's noise suppression system on the base of fiber optic sensors. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10342, p. 1034219. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2270790>.
15. Vinogradov V.Ju., Morozov O.G., Anfinogentov V.I. Prospects for the introduction of mobile aeroacoustic technologies for environmental monitoring of air turbine engines. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 12–16. [In Russian].

UDC 681.7.068.2

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.145-150

Received: 19.09.2019

Accepted: 02.10.2019

Restoration of acoustic field parameters measured by a fiber multi-sensor system on a turbomachine nozzle slice

V.Yu. Vinogradov, V.I. Anfinogentov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI
10, K. Marx Street
Kazan, 420111, Russian Federation

The article is devoted to the development and research of distributed fiber systems for aeroacoustic control of gas-air flow parameters on the nozzle section of turbomachines. The problem of source localization and restoration of the acoustic field of turbomachines is considered. The control of the aeroacoustic control system based on fiber-optic sensors based on the principles of self-learning is considered, since extreme controllers, although simply technically implemented, but have low speed, which is especially affected with a large number of control elements. Therefore, the aeroacoustic fiber-optic complex will be considered in the form of an automatic control system with the adaptation of the parameters of the mathematical model by the measured values of the flow parameters that change with the change of the

Keywords: distributed fiber systems, aero acoustic control, acoustic field, process simulation, recovery.

Виноградов Василий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ.

Область научных интересов: аэроакустическая диагностика состояния проточной части авиационных ГТД с использованием волоконно-оптических сенсорных систем, шумоглушение.

E-mail: vawin@mail.ru

Анфиногентов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ.

Область научных интересов: математическое моделирование и управление процессами тепломассопереноса при СВЧ-нагреве диэлектриков.

E-mail: v.anfinogentov@yandex.ru