

УДК 621.45.02

## МЕТОД СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ЛОПАТОК ГТД

Н. Ю. СТЕПАНЕНКО<sup>1</sup>, В. В. АСТАНИН<sup>2</sup>, В. В. ЛУКЬЯНОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> koly.stepanenko@yandex.ru, <sup>2</sup> vvastanin@yandex.ru, <sup>3</sup> lukianovv@bk.ru

<sup>1-2</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

<sup>3</sup>НПА «Технопарк авиационных технологий»

*Поступила в редакцию 26.04.2023*

**Аннотация.** Исследована возможность применения метода свободных колебаний для первичной диагностики качества полых лопаток вентилятора турбовентиляторных авиационных двигателей. Путем сопоставления реальных характеристик спектра частот колебаний с данными конечно-элементного моделирования мод колебаний проведена идентификация линий акустического спектра, показаны причины возможных искажений, вызванных несоответствием детали исходной конструкции или возникновением дефектов. В качестве примера показано возникновение дребезга из-за ошибки в конфигурации внутренней полости. Метод может быть использован в технологии изготовления деталей, а также при ремонте и обслуживании авиационных двигателей.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, лопатки вентилятора, моды колебаний, неразрушающий контроль.

### ВВЕДЕНИЕ

Интегральный метод свободных колебаний используют тысячи лет со времен появления гончарных изделий. Его давно применяют при проверке стеклянной посуды, бандажей железнодорожных колес, ударных музыкальных инструментов и других объектов по «чистоте звона», вызываемого механическим ударом. Появление в спектре колебаний дополнительных частот (дребезга) – признак наличия дефекта, как и глухой быстро затухающий звук. Данный метод определен в ГОСТ 23829-85 как "метод акустического неразрушающего контроля, основанный на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте или его части и анализе параметров этих колебаний" [1]. Различают интегральный и локальный варианты методов собственных колебаний (МСК). В первом используется колебания контролируемого объекта как единого целого, во втором (локальном) – только его части.

В настоящее время этот метод получает новое развитие в связи с появлением приборного и программного обеспечения. Корпорация Rolls-Royce применяет данный метод для контроля полых лопаток вентилятора [2]. Колебания лопатки возбуждают ударом полиуретановой киянки. Основная цель – сортировка лопаток по резонансным частотам, но спектр сигнала может содержать много другой полезной информации, например, об отсутствии диффузионных соединений в полых лопатке или появлении трещин [3].

Применение полых лопаток в авиационных ГТД получило большое распространение ввиду существенного уменьшения массы, а также улучшению эксплуатационных характеристик двигателей в целом [4]. Внутренняя конструкция полых лопаток может существенно разли-

часть, распространены двух- и трехслойные конструкции. В связи с этим появилась необходимость как в экспресс-диагностике заготовок лопаток на разных этапах производства, так и в финальной диагностике состояния внутренней конфигурации лопаток ГТД.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований были применены макеты лопатки двухслойной конструкции с внутренними ребрами жесткости, изготовленными из титанового сплава ВТ6 методом диффузионной сварки с последующей изотермической формовкой. Предполагаемые дефекты – отсутствие сварки в нужных местах либо соприкосновение перекрещивающихся ребер во внутренней полости. В любом случае можно ожидать появления в спектре лишних шумов в виде дребезга.

Макет подвешивался на нитях в акустической камере (рис. 1). Подвес макета лопатки на нитях позволил избежать влияния вибрации оснастки (дребезг, демпфирование, включение в спектр резонансных частот оснастки), возникающего при консольном закреплении за замковую часть. Возбуждение свободных колебаний осуществляли ударом молоточка с резиновым бойком в разные области макета (рис. 2).

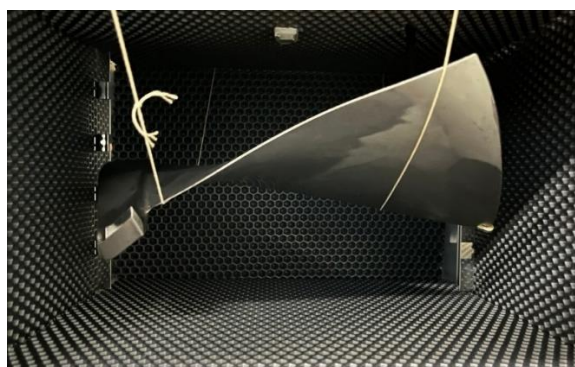


Рис. 1. Исследуемый макет лопатки в шумовибропоглощающей камере

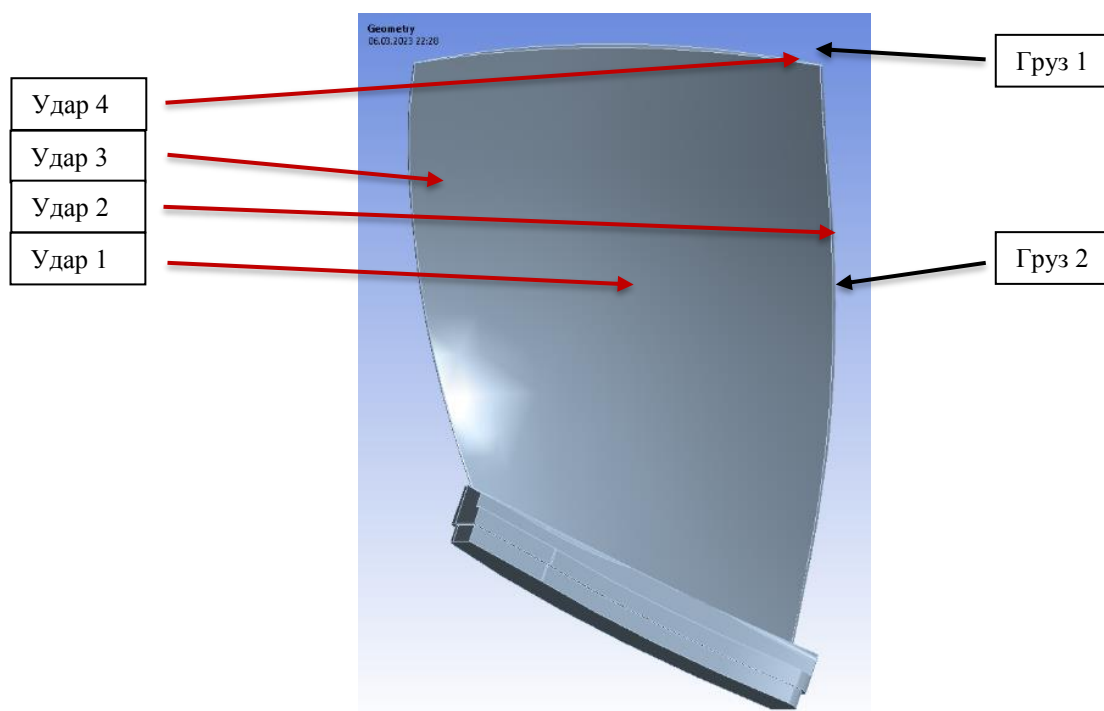


Рис. 2. Объемная математическая модель макета №1

Запись колебаний осуществлялась электретным конденсаторным микрофоном с частотным диапазоном 30 Гц... 22 кГц, подключенным к звуковой карте компьютера. Пример записанной осциллограммы приведен на рис. 3. Анализ сигналов осуществляли с помощью приложения Sound Forge Pro 11.0 в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) спектра собственных колебаний макетов лопаток. Полное время звучания  $\approx 10$  с, минимальный объем выборки для анализа спектра  $\geq 10^3$  периодов, окно сглаживания Блэкман – Харрис.

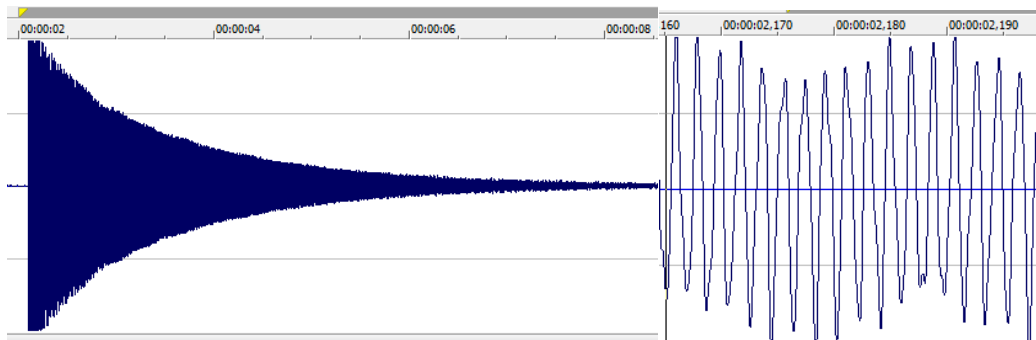


Рис. 3. Пример осциллограммы затухающих свободных колебаний после удара

Идентификацию спектральных линий по модам колебаний осуществляли на объемной математической модели, для которой в программном комплексе (ПК) «ANSYS» были найдены формы собственных колебаний (моды) и частоты, близкие к экспериментальным. Проверочные удары наносили в областях наибольшей амплитуды колебаний, выявленные моделированием. В наиболее характерных из них, для имитации влияния наружных дефектов, на макете закрепляли свинцовые грузики массой 1,6 г на верхнем углу входной кромки – груз 1 и массой 6,6 г в середине входной кромки – груз 2 (рис. 2).

Для теоретического получения частот и форм собственных колебаний макета лопатки выполнялся модальный расчет в модуле «Modal» ПК «ANSYS». Фиксация образца отсутствовала, как и в натурном эксперименте. В качестве материала был задан титановый сплав ВТ-6, соответствующий материалу макета. Была произведена поверхностная оптимизация конечно-элементной сетки с фиксированным размером стороны элемента типа «тетраэдр» 1 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

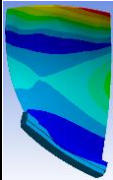
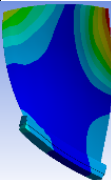
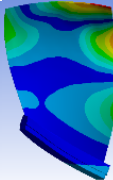

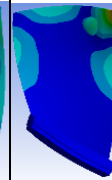
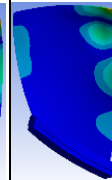
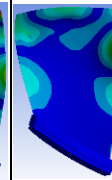
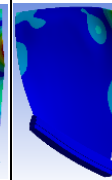
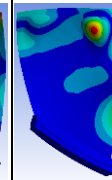
Из нескольких экземпляров макетов, подвергнутых испытаниям, выбраны два под номерами №1 и №7, полученные при различных технологических режимах. При идентичной конфигурации внешней поверхности полые макеты отличались друг от друга и от математической модели массой и толщиной стенки. Несмотря на упомянутые различия, на АЧХ свободных колебаний можно выделить общие характерные пики (рис. 4). Значения резонансных частот и соответствующие им формы колебаний представлены в табл. 1. Наиболее характерны регулярно повторяющиеся пики 1, 2, 3 и 4, соответствующие модам колебаний под теми же номерами. Для макетов 1 и 7 относительные амплитуды и расположение этих пиков идентичны. Максимальную амплитуду пика наблюдаем для первой моды колебаний. Реальная частота колебаний оказалась ниже расчетной из-за увеличенной массы и толщины стенки. Принадлежность пиков модам колебаний легко проверяется установкой груза и изменением точки удара. При изменении места удара закономерно изменяются амплитуды колебаний, а при установке грузов – частоты соответствующих мод. Так, при установке груза 1 и ударе в точку 2 резко возрастает амплитуда второй моды и понижается первой.



Рис. 4. Спектрограммы приведенных измерений

Установка груза 1 вызывает заметное снижение частот первой и третьей моды, а установка груза 2 значительно влияет на вторую и третью моды, для которых характерны наибольшие перемещения соответствующих областей макета. Влияние установленных грузов особенно сильно сказывается на высоких частотах (моды 6 и 7). При анализе спектрограммы с макета №1 с закрепленным грузом 2 видны многочисленные резонансы небольшой амплитуды, видимо, вызванные самим грузом. При ударах по макету с грузом 1 замечены искажения АЧХ в диапазоне частот 1300–1500 Гц, вызванные дребезгом груза на моде 3. В диапазоне 1700–1900 Гц замечен дребезг при ударе 2 с закрепленным грузом 2, поскольку удар выполнен в области влияния моды, наибольшее амплитудное значение которой приходится на зону закрепления груза 2. Сопоставляя спектрограммы макетов №1 и №7, замечено появление множества размытых пиков на частотах выше 2200 Гц, не соответствующих расчетным модам колебаний. Их появление может быть связано с дребезгом, вызванным дефектами в макете лопатки №7, возникшими на этапе производства. Для проверки этого предположения выполнен локальный контроль ультразвуковым эхо-методом.

Результаты модельного расчета и экспериментального исследования

		Мода	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Программный расчет	Без груза	Частота, Гц	602	1086	1356	1631	1698	2148	2310	2594	2645
		Форма колебания									
	С «грузом 1»	Отклонение, Гц	-1	-5	-4	-1	-25	-36	-4	-93	-4
	С «грузом 2»	Отклонение, Гц	0	-19	-23	-11	-8	-17	-158	-79	-39
	Эксперимент	Без груза	Частота, Гц	528	1009	1230	1586	1750	2116	2210	2546
Эксперимент	С «грузом 1»	Отклонение, Гц	-3	-13	-16	11	-12	-70	0	0	0
	С «грузом 2»	Отклонение, Гц	0	-51	-28	0	-19	-11	-78	26	0
	№7	Частота, Гц	533	1002	1198	1605	1669	1732	-	-	-

Проверка макетов ультразвуковым эхо-методом показала хороший результат диффузионной сварки в предназначенных для этого местах, но в перекрестьях ребер обнаружено двойное отражение в сочетании с интенсивным затуханием сигнала (рис. 5). Это говорит о том, что здесь ребра смяты и, возможно, соприкасаются, что и вызывает дребезг при возбуждении колебаний.

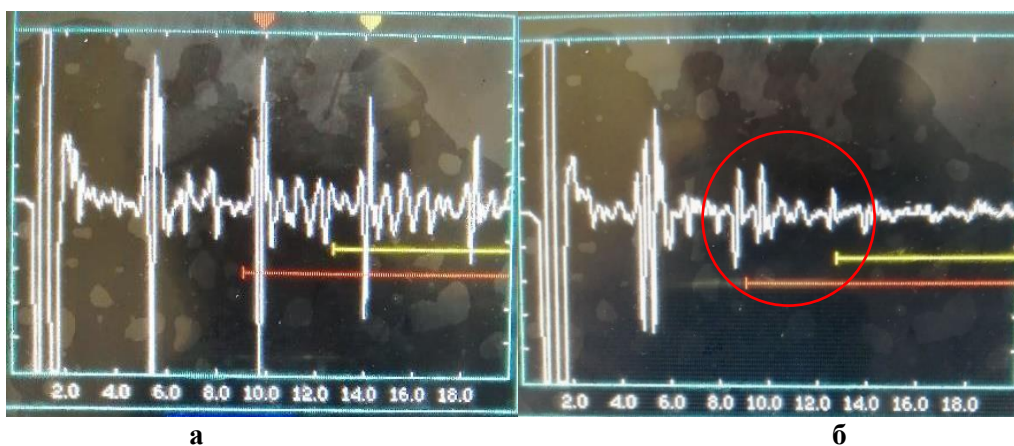


Рис. 5. Макет №7 Отражение от середины ребра (а) и от перекрестья ребер (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты экспериментального исследования макета лопатки двухслойной конструкции методом свободных колебаний и их сопоставление с расчетным модельным анализом показали объективную чувствительность АЧХ колебаний к отклонениям от заданной конструкции и внесенным дефектам. Метод свободных колебаний вполне пригоден для первичного неразрушающего экспресс-контроля качества полых лопаток вентилятора газотурбинных двигателей. Основная особенность этого метода – в простоте применяемого оборудования и оперативности выполнения, и в перспективе он может стать основой методики контроля конкретных изделий. Методика осуществляется путем сравнения АЧХ исследуемой лопатки со спектром заведомо годной лопатки или ее модели. Для оценки технического состояния в процессе эксплуатации предполагается сравнение спектра конкретной лопатки на этапе технического контроля с изначальным спектром конкретной лопатки, что повышает разрешающую способность данного метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1986. С. 2–4.
2. Rolls-Royce, How To Build A Jumbo Jet Engine -HQ- (Part 2-4) [видеозапись] // YouTube. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=MQlgK5QOu-4>
3. Неразрушающий контроль: В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практическое пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; Под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
4. Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. М.: ОАО "Авиадвигатель", 2006. 1204 с.

## ОБ АВТОРАХ

**СТЕПАНЕНКО Николай Юрьевич**, магистрант каф. АД. Дипл. Инженер-конструктор (УГАТУ, 2022), инженер-конструктор НПА «Технопарк АТ». Готовит дис. о применении виброакустического метода для диагностики дефектов полых лопаток на этапах производства и эксплуатации.

**АСТАНИН Владимир Васильевич**, профессор кафедры МиФМ ИАТМ УУНИТ. Дипл. инженер по машинам и технологии обработки металлов давлением (УАИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук (Московск. ин-т сталей и сплавов, 1996). Иссл. в обл. пластической и сверхпластической деформации, ведущий научный сотрудник НПА «Технопарк»

**ЛУКЬЯНОВ Василий Васильевич**, начальник отдела СПФ-ДС НПА «Технопарк АТМ-р техн. и технол. по материаловед. и технол. новых материалов (УГАТУ, 2011). К-т технич. наук (Казанск. фед. у-т, 2019).

## METADATA

**Title:** Natural oscillation method for primary quality diagnostics of gas turbine engine blades.

**Authors:** N. Y. Stepanenko<sup>1</sup>, V. V. Astanin<sup>2</sup>, V. V. Lukyanov<sup>3</sup>.

**Affiliation:**

<sup>1-3</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

<sup>3</sup> SPA "Technopark of Aviation Technologies", Russia.

**Email:** <sup>1</sup> koly.stepanenko@yandex.ru, <sup>2</sup> vvastanin@yandex.ru, <sup>3</sup> lukianovv@bk.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (29), pp. 138-144, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract.** The possibility of using a free vibrations method for primary diagnosis of the quality of the hollow blades of the turbofan engine was investigated. By comparing the real characteristics of the spectrum of oscillation frequencies with FEA, the identification of the acoustic lines was carried out, the causes of possible distortions caused by the inconsistency of the original design, or the occurrence of defects were shown. An example is the occurrence of dirt due to an error in the internal configuration. The method can be used in parts manufacturing technology, as well as in the repair and maintenance of aircraft engines.

**Keywords:** aviation engine, fan blades, vibratory fashion, non-destructive control.

**About authors:**

**STEPANENKO, Nikolay Yurievich**, Undergraduate, Dept. of Aircraft Engines. Design Engineer (UGATU, 2022), design engineer of SPA "Technopark of Aviation Technologies".

**ASTANIN Vladimir Vasilyevich**, Prof. of the Department of Material science IATM UGATU. Dipl. engineer for machines and technology of metal processing by pressure (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. (MISIS, 1997), research in the field of plastic and superplastic deformation, Leading Researcher of SPA "Technopark of Aviation Technologies".

**LUKIANOV, Vasili Vasilevich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Engineering technology. Magistrate of technic and technology (UGATU, 2011). Cand. of Tech. Sci. (KFU, 2019).