

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ЗАПИСИ ИНТЕРФЕРОГРАММ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГТД ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПАНОРАМНОГО ТИПА

© 2024

А. В. Ивченко кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
fgrt@yandex.ru

А. И. Сафин кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
safin.ai@ssau.ru

Изучено действие широкополосных механических возмущений на работу помехоустойчивого цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазерным излучателем и диффузно-рассеивающим оптическим элементом, установленным перед колеблющимся колесом турбины. Получены зависимости видности регистрируемых интерферограмм при различных видах искусственно создаваемых помех. Показано, что наиболее опасными возмущениями для работы спекл-интерферометра являются периодические удары и розовый шум, тогда как белый шум и естественные колебания пола помещения, где размещалась экспериментальная установка, существенно не ухудшают качество записываемой информации. Анализируется влияние механических свойств диффузно-рассеивающего элемента интерферометра на качество получаемых интерференционных картин. Отмечена связь между ростом вынужденных тангенциальных колебаний диффузно-рассеивающего элемента и снижением контраста интерференционных полос. Экспериментально показано, что увеличение толщины оргстеклянной пластины диффузно-рассеивающего элемента до 8 мм способствует нейтрализации действия розового шума, в то время как воздействие периодических ударных нагрузок снижает контрастность записываемых интерференционных картин при использовании диффузно-рассеивающего элемента с оргстеклянными пластинами толщиной 5 и 8 мм.

Газотурбинный двигатель; рабочее колесо турбины; вибрация; регистрация; спекл-интерферометр; механическое возмущение; интерферограмма; качество; видность

Цитирование: Ивченко А.В., Сафин А.И. Исследование влияния широкополосных механических возмущений на качество записи интерферограмм колебаний рабочего колеса ГТД при использовании цифрового спекл-интерферометра панорамного типа // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 160-176. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-160-176

Введение

Создание надёжной аэрокосмической техники в настоящее время осуществляется путём организации мероприятий по прочностной доводке конструкции [1], одним из которых является исследование собственных частот и форм колебаний ответственных деталей и узлов. Применительно к конструкции летательных аппаратов таким ответственным изделием является газотурбинный двигатель (ГТД), определяющий безопасность эксплуатации воздушного судна в полёте [2]. Работа авиационного ГТД сопровождается сложными динамическими процессами, учёт которых позволяет обеспечить высокую безотказность двигателя, помогает предотвратить в будущем лётные происшествия и аварии [3].

При поузловой доводке ГТД [1; 4] особое внимание уделяется исследованию колебаний рабочих колёс компрессора и турбины двигателя для предотвращения разрушения этих изделий при возникновении резонансных процессов [5 – 7], в случае ротор-

но-статорного взаимодействия [8; 9], флаттере [10; 11] и. т. п. Данная задача осложняется из-за того, что облопаченное рабочее колесо ГТД совершает связанные колебания, представляя собой единую механическую систему [4]. При связанных колебаниях диск рабочего колеса и лопатки могут иметь отдельные наборы собственных частот, что затрудняет задачу отстройки ГТД от возникающих резонансных процессов.

Изучение вибрационного состояния рабочих колёс ГТД традиционно производится методом тезометрирования путём установки системы датчиков на поверхности исследуемого изделия [7; 12 – 14]. Тензометрирование позволяет получить пространственное распределение амплитуд колебаний поверхности объекта в зависимости от частоты возбуждающей силы. Полученная информация в дальнейшем используется для оценки уровня вибронпряжений, возникающих в колесе при эксплуатации ГТД [15], а также для верификации разрабатываемых конечно-элементных моделей роторных систем [16]. Однако недостаточное пространственное разрешение полей вибросмещений, записанных ограниченным числом датчиков в процессе диагностики, затрудняет анализ, оценку и интерпретацию полученных экспериментальных данных [13]. Последнее обстоятельство в процессе разработки ГТД иногда приводит к инженерным ошибкам [17] и определяет необходимость развития панорамных оптических методов измерения [18; 19], способных предоставить более полную информацию о вибрации объекта.

На практике оптические исследования вибрационных процессов могут быть выполнены методами голографии и цифровой спекл-интерферометрии [20 – 22]. Эти методы способны предоставить информацию о колебании объекта в виде полей амплитуд вибросмещения поверхности, зашифрованных в интерференционных полосах записанной интерферограммы. Оба метода позволяют регистрировать колебания объектов с оптически грубыми поверхностями [21], обеспечивая на современном уровне развития оптоэлектроники одновременное получение измерительной информации с $10^4 \dots 10^7$ точек на поверхности объекта [21; 22]. При этом важным достоинством спекл-интерферометрии по сравнению с голографическим процессом является возможность осуществления цифровой записи и обработки результата интерференции пучков, что обеспечивает высокую производительность измерительного процесса.

Традиционное исследование колебаний объекта методом цифровой спекл-интерферометрии производится с применением импульсных лазеров, обеспечивающих отстройку от случайных механических воздействий на оптическую схему спекл-интерферометра [20]. Другой возможностью записи спекл-интерферограмм является использование непрерывных когерентных источников света при размещении интерферометра и объекта исследования на виброизолированном оптическом столе [21]. Последнее условие накладывает существенное ограничение на габариты исследуемых объектов и может быть преодолено за счёт использования программного метода обработки информации [23]. Накопление и статистическая обработка интерферограмм, регистрируемых методом усреднение во времени [20], позволили создать на базе непрерывных лазеров ряд помехоустойчивых цифровых спекл-интерферометров, обеспечивающих запись колебаний объекта без виброизоляции. Предложенный метод [23], показал себя надёжным инструментом записи интерферограмм в лабораторных условиях [24]. Однако для дальнейшего расширения границ применимости метода [23] необходимы дополнительные исследования влияния на процесс записи интерферограмм помех различного вида. В этой связи наибольший интерес представляют собой широкополосные механические возмущения, содержащиеся в спектре как низкочастотные, так и высокочастотные составляющие. К таким возмущениям можно отнести различные виды шумового процесса [25], а также периодические ударные воздействия [26]. При определённом уровне механического воздействия на оптическую схему спекл-интерферометра данные возмущения способны повлиять на корреляцию взаимо-

действующих спекл-полей и вызвать снижение контраста записываемых интерферограмм [27]. Выявление связи между видностью регистрируемой интерференционной картины и параметрами широкополосных возмущений, действующих на спекл-интерферометр, является первым шагом на пути повышения помехоустойчивости разрабатываемого прибора, определения подходящих для этого методов и средств. Решение этой задачи позволит более широко использовать спекл-интерферометры с непрерывными лазерами без специальных средств виброзащиты в составе испытательных измерительных комплексов, а также в промышленных условиях.

Экспериментальная установка

Изучение влияния широкополосных механических возмущений на работу оптической схемы цифрового спекл-интерферометра производилось на экспериментальной установке, подробно описанной в [28; 29]. Схема экспериментальной установки и её общий вид представлены на рис. 1, 2. Установка содержит в своём составе мобильный цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазером (поз. 1 – 19, рис. 1), оптическая схема которого соответствует патенту [30], и лазерный доплеровский виброметр Polytec PDV-100 (поз. 20 на рис. 1).

При проведении экспериментов спекл-интерферометр обеспечивал регистрацию интерферограмм колебаний объекта (поз. 8, рис. 1), возбуждаемого на частоте $f \cong 3971$ Гц пьезоэлектрическим приводом (поз. 16, рис. 1). В качестве объекта исследования было использовано рабочее колесо осевой турбины малоразмерного ГТД диаметром 280 мм [28], у которого на частоте f возбуждалась собственная форма колебаний «2-диаметр» [4]. Перед рабочим колесом турбины на минимальном расстоянии (5...10 мм) располагался диффузно-рассеивающий элемент (поз. 12, 13, рис. 1), представляющий собой пластину из плексигласа ($410 \times 410 \times h$ мм, h – толщина оргстекла), закреплённую по периметру на металлической раме. Свет, диффузно отражённый от поверхности объекта и внешней поверхности диффузно-рассеивающего элемента, формировал предметный и опорный пучки спекл-интерферометра, создавая интерференцию на светочувствительной матрице видеокамеры (поз. 5 рис. 1).

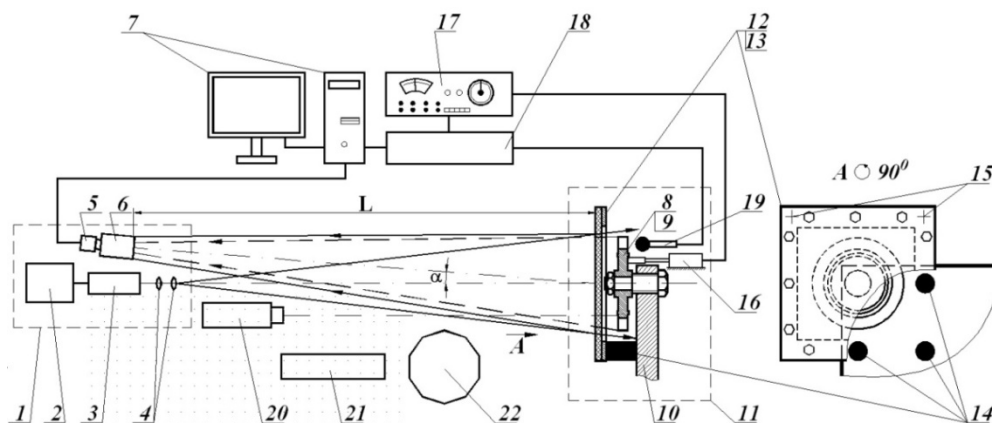


Рис. 1. Схема лазерной системы для регистрации форм колебаний колес ГТД:

1 – подвижный геодезический штатив; 2 – источник питания твердотельного лазера с диодной накачкой (DPSS-лазер); 3 – излучатель DPSS-лазера; 4 – микрообъектив; 5 – видеокамера; 6 – объектив камеры; 7 – компьютер; 8 – рабочее колесо (объект); 9 – болтовое соединение; 10 – голографический стенд; 11 – основание; 12, 13 – диффузно-рассеивающий элемент; 14 – магнитная подвеска; 15 – дополнительные точки опоры; 16 – пьезоэлектрический механический привод; 17 – генератор звуковых частот ГЗ56/1; 18 – цифровой осциллограф PCSU1000; 19 – микрофон; 20 – доплеровский виброметр Polytec PDV-100; 21 – топольная машина EM50 Look line; 22 – додекайдер Look line с генератором шума D301. Параметры схемы: $L=2000$ мм, $\alpha = 10-15^\circ$

В работе [29] было показано существенное влияние механических свойств диффузно-рассеивающего элемента на качество регистрируемых интерференционных картин. Поэтому при возбуждении широкополосных помех производилась запись нормальных и тангенциальных колебаний поверхности диффузно-рассеивающего элемента посредством лазерного виброметра Polytec PDV-100. В экспериментах также производилась запись виброускорений поверхности диффузно-рассеивающего элемента при помощи шумомера «Экофизика», датчик которого закреплялся на металлической раме этого оптического элемента.

Широкополосные механические возмущения в установке создавались при помощи топольной машины EM50 Look line 21 (поз. 21, рис. 1), устанавливаемой на разных расстояниях ($R = 2400, 4200$ и 4800 мм) от объекта исследования, а также посредством додекайдера Look line с генератором белого и розового шума D301 (поз. 22, рис. 1), расположенном на дистанции $R = 4500$ мм от объекта. Топольная машина EM50 Look line в процессе эксплуатации создавала периодические удары с частотой $f_{TM} = 10$ Гц, которые распространялись в виде механических возмущений по полу помещения, в котором располагалась экспериментальная установка.

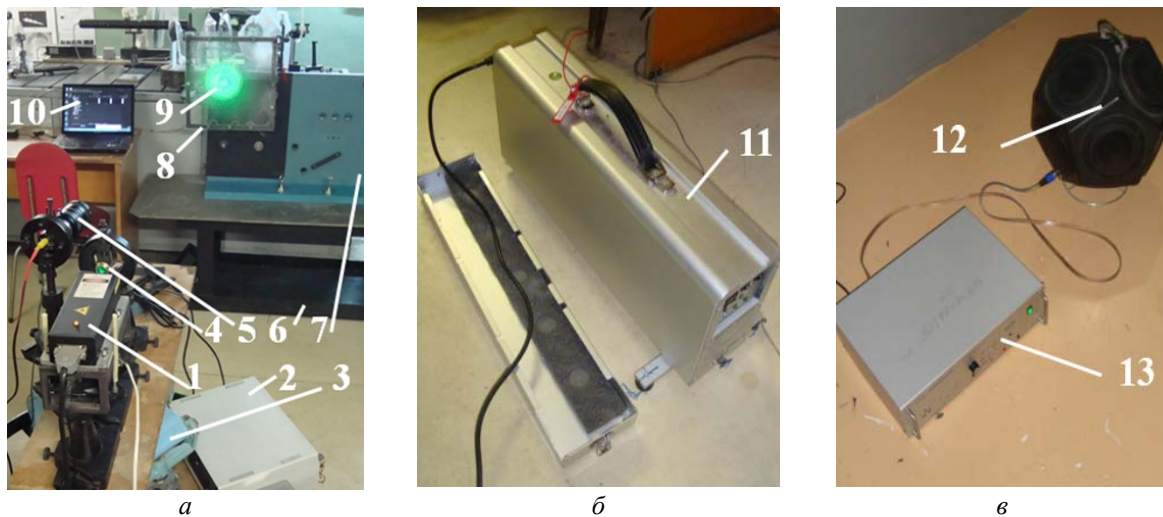


Рис. 2. Общий вид лазерной системы на основе помехоустойчивого спекл-интерферометра (а) и устройств для возмущения помех (б; в):

1 – DPPS-лазер; 2 – блок питания лазера; 3 – геодезический штатив; 4 – микро-объектив; 5 – видеокамера; 6 – основание; 7 – голографическая плита; 8 – оптический диффузор; 9 – рабочее колесо (объект); 10 – компьютер; 11 – топольная машина EM50 Look line; 12, 13 – додекайдер Look line с генератором шума D301

Режим использования топольной машины EM50 Look line был фиксирован как по частоте f_{TM} , так и по величине ударной нагрузки, поэтому уровень возмущения, достигающий объекта, определялся расстоянием R . Додекайдер Look line с генератором шума D301 создавал возмущение в полосе частот от 0 до 20 кГц. Максимальная мощность генератора составляла 300 Вт и могла изменяться дискретно с шагом 30 Вт. В процессе работы додекайдер Look line создавал звуковое поле, которое возбуждало окружающие объекты. Для того, чтобы исключить акустическое воздействие на установку, додекайдер Look line располагался за строительной перегородкой, что обеспечило передачу на элементы оптического тракта спекл-интерферометра только механических возмущений.

Воздействие на экспериментальную установку топольной машины EM50 Look line и додекайдера Look line приводило к распространению по элементам её конструк-

ции вынужденных механических колебаний и возникновению дополнительной оптической разности хода между рабочим колесом турбины и диффузно-рассеивающим элементом. Данное явление оказывало непосредственное влияние на процесс записи интерференционной картины и снижало её контрастность. При анализе записанных интерферограмм значение контраста смежных интерференционных полос определялось по параметру видности V_m^k в соответствии с методикой [28; 29; 31]:

$$V_m^k = \frac{I_{\text{MAX}}^{k-1} - I_{\text{MIN}}^k}{I_{\text{MAX}}^{k-1} + I_{\text{MIN}}^k}, k = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

В формуле (1) величина I_{MAX}^{k-1} представляет собой максимум интенсивности излучения яркой полосы $(k-1)$ -го порядка, I_{MIN}^k обозначает минимум интенсивности излучения для тёмной полосы k -го порядка, а N – максимальный порядок тёмных полос на интерферограмме. Вследствие неравномерности контраста интерференционной картины при регистрации рабочего колеса турбины, для оценки видности на k -м порядке интерференции использовался интегральный параметр, основанный на определении интерференционного контраста по четырём локальным участкам изображения [28]:

$$V^{(k)} = \frac{1}{4} \sum_{m=1}^4 V_m^k, \quad (2)$$

где V_m^k – видимость темных полос k -го порядка m -го участка спекл-интерферограммы.

Представленные формулы позволяют оценить степень снижения качества записываемых интерферограмм в зависимости от вида искусственно создаваемой помехи, а также её интенсивности. Это открывает возможность количественного исследования влияния широкополосных помех на контраст регистрируемых интерферограмм и может быть в дальнейшем использовано для разработки методик дополнительного повышения помехоустойчивости цифровых спекл-интерферометров с непрерывными лазерными излучателями.

Результаты и обсуждение

Для определения влияния механических свойств компонентов оптической схемы цифрового спекл-интерферометра на качество записи интерферограмм в эксперименте был использован диффузно-рассеивающий элемент с двумя сменными оргстеклянными пластинами толщиной $h = 5$ и 8 мм. Изменение толщины оргстекла h обеспечивало увеличение жёсткости используемого диффузно-рассеивающего элемента, а также смещение его первой собственной частоты в область более высоких частот [29; 32].

Перед началом испытаний при помощи доплеровского виброметра PDV-100 были определены уровни виброскоростей нормальной и тангенциальной компонент колебания поверхности диффузно-рассеивающего элемента (рис. 3). В начальный момент оптическая схема спекл-интерферометра находилась в относительном покое, совершая движения, соответствующие естественным колебаниям здания. В этих условиях виброускорение металлической рамы диффузно-рассеивающего элемента не превышало значения $0,6 \text{ м/с}^2$. Из рис. 3 видно, что естественная вибрация диффузно-рассеивающего элемента локализована в диапазоне $0 \dots 100$ Гц. При этом независимо от толщины оргстеклянной пластины h преобладают нормальные колебания оптической поверхности ($VS_n > VS_r$), а уровень виброскорости достигает 10^{-3} мм/с.

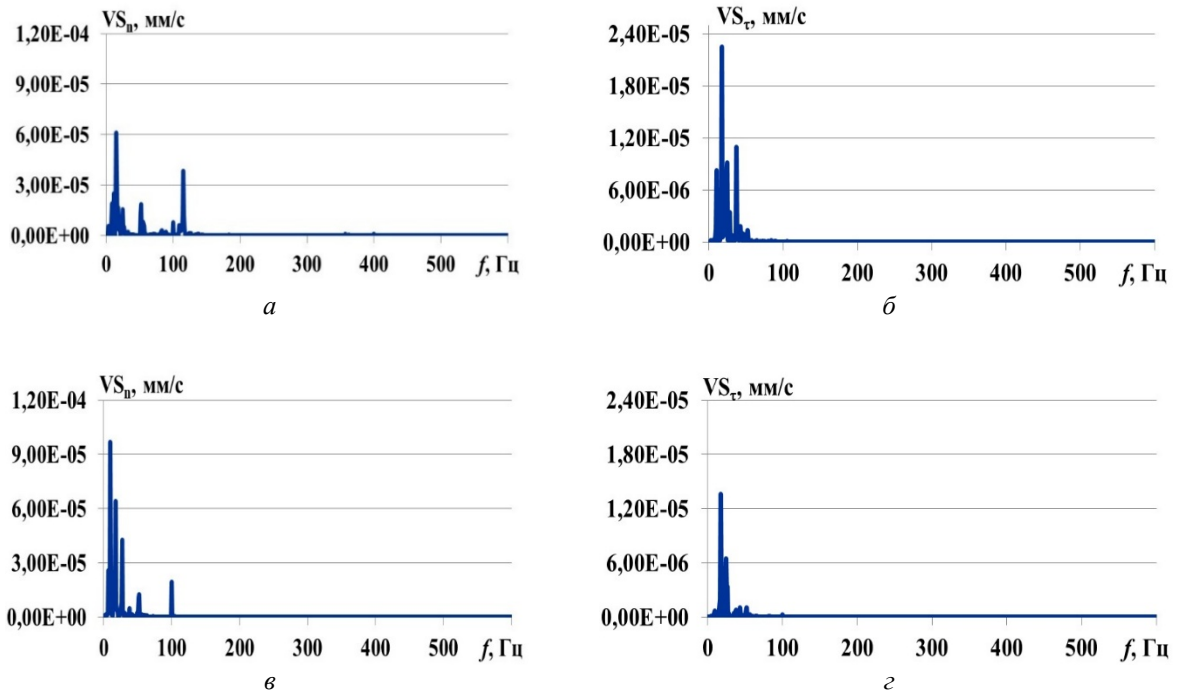


Рис. 3. Спектры нормальной (VS_n) и тангенциальной (VS_τ) компонент виброскорости диффузно-рассеивающих элементов, возбуждаемые случайными механическими возмущениями до начала записи интерферограмм. Толщины пластин из оргстекла диффузно-рассеивающих элементов: а, б – $h = 5$ мм; в, г – $h = 8$ мм

Начало работы на установке (рис. 4), сопряжённое с включением основных систем и возбуждением объекта на частоте $f \cong 3971$ Гц, сопровождалось изменением вибрационного состояния диффузно-рассеивающего элемента, при котором уровень наблюдаемых виброскоростей увеличивался на порядок ($VS_n \cong 10^{-2}$ мм/с). На представленных на рис. 4 спектрах виброскорости сохраняется преобладание нормальных составляющих низкочастотных компонент вибрации ($VS_n > VS_\tau$ при $f < 100$ Гц), хотя различие между компонентами VS_n и VS_τ уменьшается и становится близким к значению $VS_\tau/VS_n \cong 0,4 \dots 0,5$. Кроме того, на графиках рис. 4 присутствует высокочастотная дискретная компонента ($f \cong 3971$ Гц), соответствующая частоте возбуждения объекта. Полученный результат соответствует данным работы [29], где был обнаружен эффект синхронизации колебаний диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра и возбуждённого на резонансе рабочего колеса турбины.

Очевидно, что присутствие в естественных условиях низкочастотных колебаний на оптическом элементе, формирующим опорный пучок спекл-интерферометра, должно сказываться на качестве регистрируемых изображений и, в частности, на контрасте записываемых интерференционных полос. Для оценки влияния случайных возмущений на работу спекл-интерферометра при толщине оргстеклянной пластины $h = 5$ и 8 мм были зарегистрированы две серии изображений, по 16 интерферограмм в каждой, и определены значения их видности.

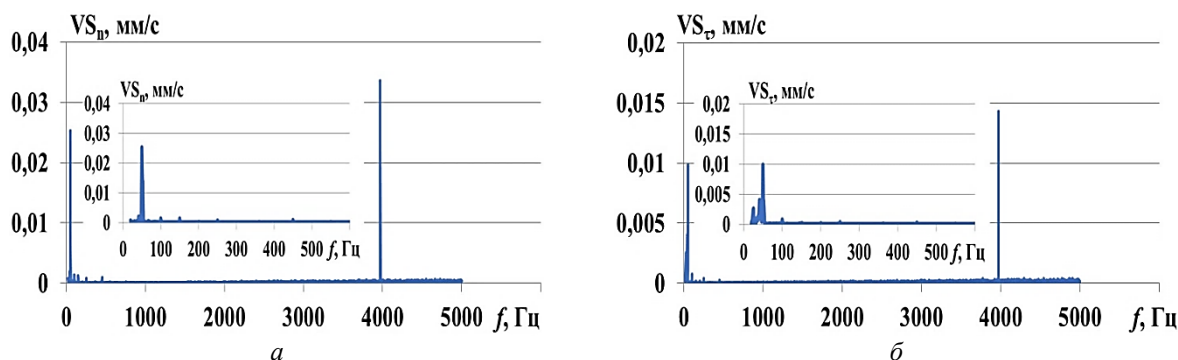


Рис. 4. Характерные спектры нормальной VS_n и тангенциальной VS_t компонент виброскорости диффузно-рассеивающего элемента при воздействии случайных возмущений и вибрации рабочего колеса турбины на частоте $f \cong 3971$ Гц. Толщина оргстеклянной пластины диффузно-рассеивающего элемента $h = 5$ мм

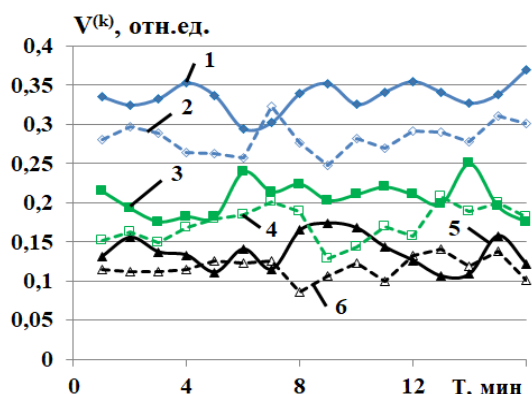


Рис. 5. Вариации видности интерферограмм в процессе их последовательной регистрации в различные моменты времени T :
 1 – $k = 1$, $h = 8$ мм; 2 – $k = 1$, $h = 5$ мм;
 3 – $k = 2$, $h = 8$ мм; 4 – $k = 2$, $h = 5$ мм;
 5 – $k = 3$, $h = 8$ мм; 6 – $k = 3$, $h = 5$ мм;
 k – порядок интерференции;
 h – толщина оргстекла

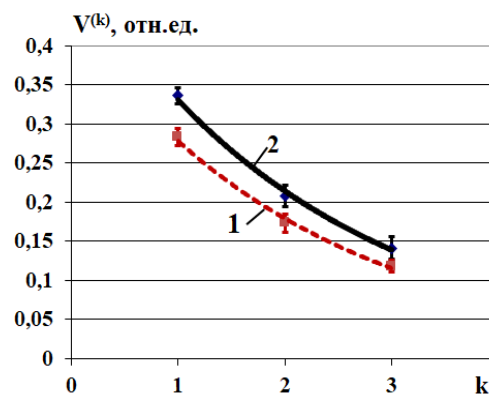


Рис. 6. Изменение видности интерферограмм колебаний рабочего колеса турбины при воздействии случайных возмущений у различных порядков интерференции k при изменении толщины оргстеклянной пластины h диффузно-рассеивающего элемента:
 1 – $h = 5$ мм; 2 – $h = 8$ мм

Эти серии изображений формировали вариационные ряды $V^{(k)}$ и были получены в течение 16 минут. Количество интерферограмм в серии было выбрано с учётом обеспечения репрезентативности выборки и соответствовало требованию стандарта [33]. Данные серии позволяли количественно определить рассеивание значений контраста интерференционных полос для оценки качества регистрируемых в опытах интерференционных картин.

На рис. 5, 6 представлены изменения видности $V^{(k)}$ первых трёх смежных полос интерференционных картин, обусловленных вибросмещением поверхности объекта в зоне пучности рабочего колеса (рис. 7, а). Согласно рис. 6 видность интерференционной картины $V^{(k)}$ падает с увеличением порядка интерференции k и наилучшим образом соответствует экспоненциальному закону аппроксимации [34]. Также с увеличением порядка интерференции k наблюдается уширение доверительного интервала рассеивания случайной величины $V^{(k)}$ и увеличение относительной погрешности эксперимента с 3% до 10%.

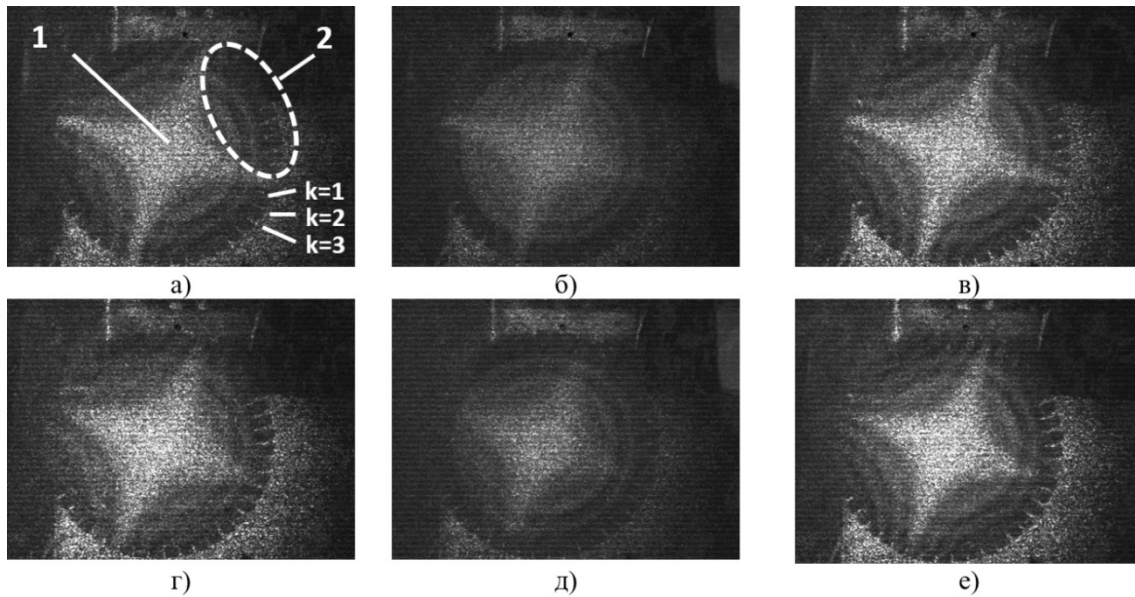


Рис. 7. Характерный вид интерферограмм рабочего колеса турбины, колеблющегося на частоте $f \cong 3971$ Гц при генерации розового шума додекайдером Look line (а, б, в) и при работе топольной машины EM50 Look line (г, д, е):
а, г – до включения источника помехи; б, д – при воздействии широкополосных возмущений на оптическую схему спекл-интерферометра; в, е – через 10 мин после выключения источника помехи; 1 – зона узла на поверхности рабочего колеса турбины (нулевая светлая интерференционная полоса); 2 – зона пучности; $k = 1, 2, 3$ – тёмные интерференционные полосы k -го порядка; толщина оргстеклянной пластины диффузно-рассеивающего элемента $h = 5$ мм

В то же время при сравнении видности полос $V^{(k)}$ для диффузно-рассеивающих элементов с различными значениями h , можно отметить, что использование оргстеклянной пластины толщиной $h = 5$ мм приводит к понижению контраста регистрируемых интерференционных полос (рис. 6). Это качественно согласуется с данными работы [29] и объясняется уменьшением жёсткости диффузно-рассеивающего элемента. По этой причине данный оптический элемент оказывается более восприимчивым к внешним механическим воздействиям, что при больших перемещениях его отражающей поверхности могло привести к нарушению интерференции [30].

Для определения границ данного физического эффекта были проведены экспериментальные работы, связанные с изучением влияния широкополосных механических возмущений на изменение видности $V^{(k)}$ регистрируемых интерферограмм. В качестве целевого параметра эксперимента была выбрана видность первого порядка интерференции $V^{(1)}$, обусловленная контрастом нулевой светлой и первой темной интерференционных полос. С одной стороны, это было вызвано наблюдаемым вибрационным смазом интерференционных полос высоких порядков под действием помехи (рис. 7, б, д), а с другой стороны – малой величиной ожидаемой относительной погрешности, оценённой выше.

Исследования производились в два этапа. На первом этапе было рассмотрено влияние на работу цифрового спекл-интерферометра различных уровней интенсивности белого и розового шума, возбуждаемого при мощности генератора (D301) 90, 150 и 300 Вт. После этого производилось изучение влияния периодических ударных нагрузок, создаваемых топольной машиной EM50 Look line. Эксперименты реализовывались последовательными сериями с перерывами (не менее 60 мин) для релаксации оптической схемы интерферометра. Воздействие же на оптическую схему спекл-интерферометра осуществлялось соответствующим источником помехи в течение

$T = 10$ мин. Во время этого воздействия через 1, 5 и 10 мин производились записи интерферограмм (рис. 7), что позволяло отследить динамику процесса во времени.

Полученные в ходе экспериментов результаты представлены на рис. 7 – 12. Рис. 7 демонстрирует изменение качества интерферограмм, записанных до начала эксперимента (рис. 7, а, з), во время его проведения (рис. 7, б, д) и после его завершения (рис. 7, в, е).

Вибрационное состояние диффузно-рассеивающего элемента во время опытов представляет собой спектры тангенциальной составляющей виброскорости (см. рис. 8 – 10), а количественная оценка изменения видности $V^{(l)}$ интерференционных полос изображений представлена на рис. 11 – 12.

Согласно [30] тангенциальная составляющая вибрации диффузно-рассеивающего элемента оказывает существенное влияние на декорреляцию спеклов, и поэтому может быть использована для анализа помехоустойчивости оптической схемы спекл-интерферометра. При проведении данной работы сначала было установлено, что воздействие белого и розового шума при мощности помехи на уровне 90 и 150 Вт не вызывало изменения видности записываемых интерференционных картин. В этой связи дальнейшее сравнение результатов производилось только при мощности возмущающего воздействия порядка 300 Вт. В ходе экспериментов было установлено, что воздействие белого шума оказывает меньшее влияние на работу спекл-интерферометра (кривые 1, 2 на рис. 11) при одинаковой мощности, чем воздействие розового шума (кривые 3, 4 на рис. 11). В этих условиях видность записываемых интерферограмм $V^{(l)}$ снижалась с 0,287...0,312 и достигала 0,18...0,22. Наиболее сильно видность интерференционных картин (рис. 7, а, б, в) изменялась под действием розового шума при использовании диффузно-рассеивающего элемента с тонким оргстеклом ($h = 5$ мм) и стабилизировалась на уровне $V^{(l)} = 0,18$ через 5 мин после включения генератора шума D301 (рис. 11, линия 4).

Наблюдаемый эффект можно объяснить из сравнения спектров виброскорости VS_{τ} , представленных на рис. 8, 9. Согласно рис. 8, воздействие белого шума на оптическую схему спекл-интерферометра приводило к появлению на рабочей поверхности исследуемого оптического элемента низкочастотных дискретных спектральных компонент (при $f < 300$ Гц) с непрерывно нарастающей высокочастотной составляющей. Уровень этих компонент (см. рис. 8) не превышал 0,01 мм/с и снижался при использовании диффузно-рассеивающего элемента с оргстеклом большей толщины ($h = 8$ мм).

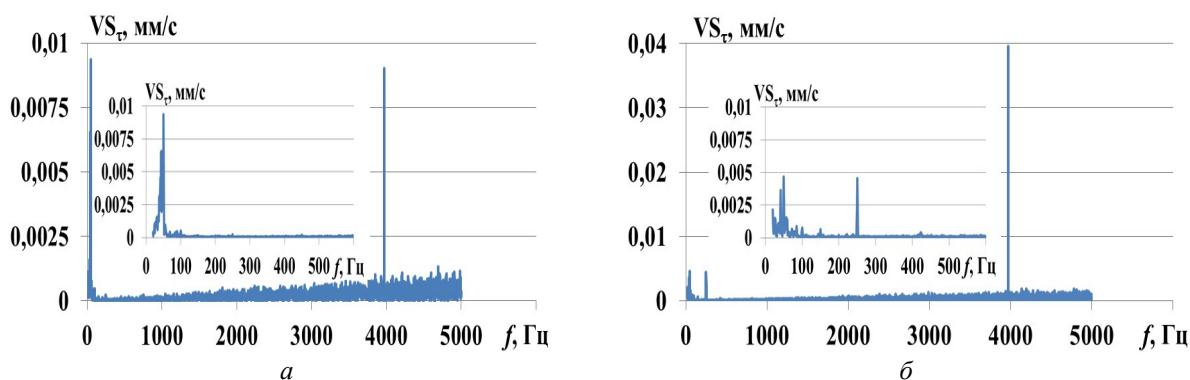


Рис. 8. Спектры тангенциальной VS_{τ} компоненты виброскорости вынужденных колебаний диффузно-рассеивающего элемента при воздействии белого шума в зависимости от толщины оргстеклянной пластины: а – $h = 5$ мм; б – $h = 8$ мм. Мощность генератора D301 300 Вт

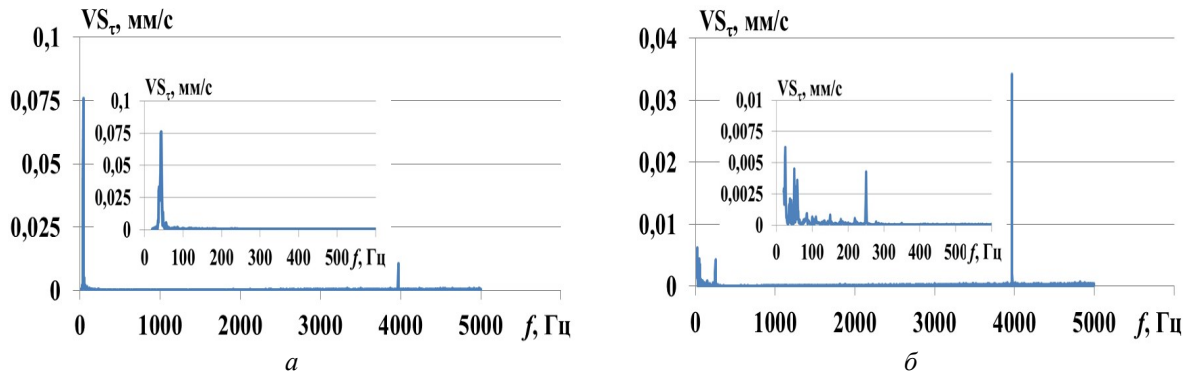


Рис. 9. Спектры тангенциальной (VS_t) компоненты виброскорости вынужденных колебаний диффузно-рассеивающего элемента при воздействии розового шума в зависимости от толщины оргстеклянной пластины: а – $h = 5$ мм; б – $h = 8$ мм. Мощность генератора D301 – 300 Вт

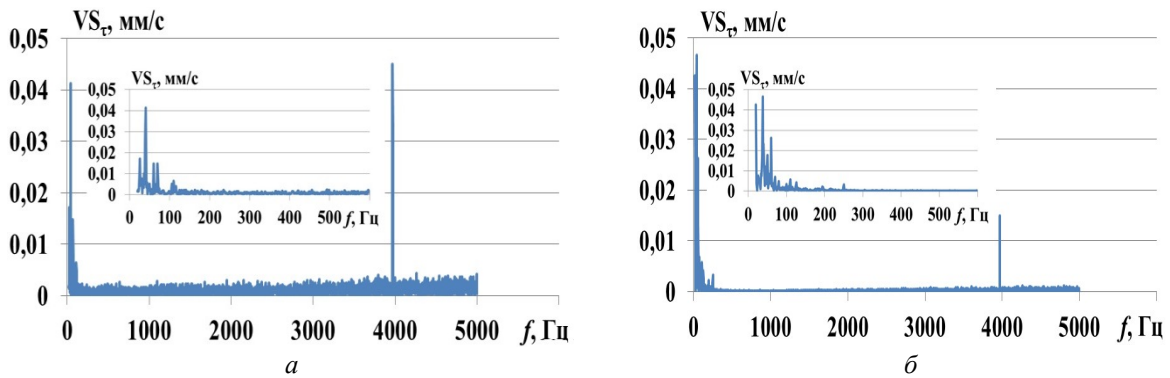


Рис. 10. Спектры тангенциальной (VS_t) компоненты виброскорости вынужденных колебаний диффузно-рассеивающего элемента при работе топольной машины EM50 Look line: а – $h = 5$ мм; б – $h = 8$ мм. Расстояние от объекта до топольной машины $R = 4800$ мм

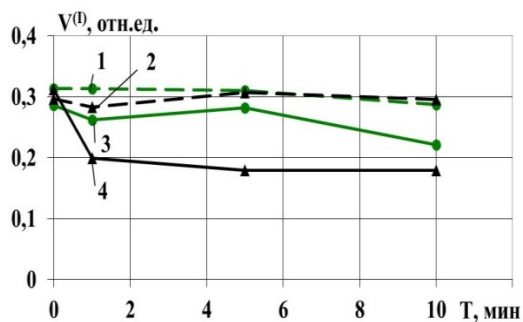


Рис. 11. Изменение видности интерференционных полос интерферограмм при различных видах широкополосных помех, действующих в течение 10 мин, при использовании оргстеклянных пластин диффузно-рассеивающих элементов разной толщины: 1 – $h = 8$ мм, белый шум; 2 – $h = 5$ мм, белый шум; 3 – $h = 8$ мм, розовый шум; 4 – $h = 5$ мм, розовый шум. Мощность генератора D301 – 300 Вт

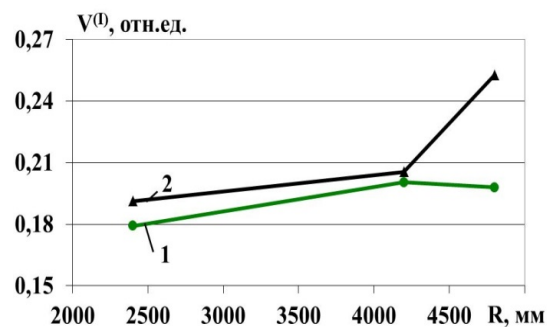


Рис. 12. Изменение видности интерференционных полос интерферограмм при различном расстоянии R от рабочего колеса до топольной машины (эпицентр возмущений) в зависимости от толщины оргстеклянных пластин диффузно-рассеивающих элементов:
1 – $h = 8$ мм; 2 – $h = 5$ мм

Такие колебания диффузно-рассеивающего элемента находились на уровне естественных помех (см. рис. 4 и рис. 8) и, следовательно, не могли изменить видность записываемых интерферограмм. При этом воздействие на спекл-интерферометр розового шума сопровождалось резким падением контраста интерференционных полос (рис. 7, б) и было обусловлено значительным увеличением тангенциальной составляющей вибрации VS_r (рис. 9). Различное влияние белого и розового шума при одном уровне мощности генератора D301 (300 Вт) на процесс работы спекл-интерферометра объясняется зависимостью плотности мощности данных помех от частоты [25]. При белом шуме энергия механического возмущения равномерно распределялась по частотам заданного спектрального интервала и приводила к возбуждению только собственных частот диффузно-рассеивающего элемента.

В то же время энергия розового шума концентрировалась в области низких частот, определяя интенсификацию вибрационного процесса. Последнее подтверждают данные по виброускорению металлической рамы диффузно-рассеивающего элемента, согласно которым при белом шуме виброускорение имело значение $a_v = 0,8 \dots 1,2 \text{ м/с}^2$, а при розовом шуме достигало $1,5 \dots 2,1 \text{ м/с}^2$.

Дальнейшие исследования видности $V^{(l)}$ были связаны с изучением воздействия периодических ударных нагрузок на процесс записи интерферограмм (рис. 7, з, д, е), как при изменении интенсивности источника помехи, так и жёсткости диффузно-рассеивающего элемента за счёт использования прозрачных оргстеклянных пластин толщиной $h = 5$ и 8 мм. Интенсивность помехи задавалась путём установки топольной машины EM50 Look line на расстояниях до рабочего колеса турбины $R = 2400, 4200$ и 4800 мм. Возможность регулирования уровня механических возмущений составных частей спекл-интерферометра была подтверждена путём измерения виброускорения металлической рамы диффузно-рассеивающего элемента. Измерения показали, что во время запуска топольной машины диффузно-рассеивающий элемент при $R = 2400$ мм имел виброускорение $a_v = 2,38 \text{ м/с}^2$, при $R = 4200$ мм – $a_v = 1,5 \text{ м/с}^2$, а при $R = 4800$ мм – $a_v = 1,42 \text{ м/с}^2$.

Действие ударных нагрузок показало, что видность интерференционных картин $V^{(l)}$ в ходе проведения эксперимента сразу снижалась после включения источника помехи и незначительно менялась. При близком расположении топольной машины относительно объекта регистрации ($R = 2400$ мм) видность интерферограмм имела значение $V^{(l)} = 0,179 \dots 0,191$ (рис. 12).

Последующее увеличение расстояния R сопровождалось постепенным ростом видности $V^{(l)}$, которая при $R = 4200$ мм имела значение $V^{(l)} = 0,2 \dots 0,21$, а при $R = 4800$ мм составляло $V^{(l)} = 0,198 \dots 0,253$. Хотя при $R < 4200$ мм наблюдаемые значения контраста интерферограмм $V^{(l)}$ для диффузно-рассеивающих элементов различной жёсткости были близки (рис. 12 линии 1 и 2), видность интерференционных картин $V^{(l)}$ при толщине оргстеклянной пластины $h = 5$ мм оказалась выше, чем при толщине $h = 8$ мм. Особенно это проявляется при установке топольной машины на расстоянии $R = 4800$ мм, когда видность интерферограмм, записанных с использованием тонкой оргстеклянной пластины ($h = 5$ мм), входящей в состав диффузно-рассеивающего элемента, увеличивалась до $V^{(l)} = 0,253$ (линия 2 на рис. 12).

Наблюдаемые зависимости можно объяснить, производя сравнение спектров виброскорости VS_r , приведённых на рис. 10, 11. Из спектральных кривых на рис. 11, а, б видно, что низкочастотные компоненты виброскорости в интервале частот $f \sim 38 \dots 40$ Гц на 11%, а для $f \sim 60$ Гц на 77%, выше у диффузно-рассеивающего эле-

мента с толстой оргстеклянной пластиной ($h = 8$ мм) по сравнению с оптическим элементом, который имел в составе пластину из тонкого оргстекла ($h = 5$ мм). Это доказывает, что в данном случае диффузно-рассеивающий элемент с $h = 8$ мм испытывает более интенсивную вибрацию, которая приводит к получению более низких значений видности регистрируемых интерферограмм (сравнивая кривую 1 с кривой 2 на рис. 12). Характерной особенностью работы топольной машины также является возбуждение дополнительных дискретных компонент вибрации на поверхности диффузно-рассеивающего элемента (при $f < 100$ Гц), которых нет в спектрах, полученных при генерации белого и розового шума (рис. 10, 11).

Возможная причина наблюдаемого эффекта может быть связана с различием в спектральной плотности компонент вынуждающей силы при периодических ударах и генерации розового шума, а также возможности их пропускания и рассеивания другими элементами конструкции спекл-интерферометра [35]. В рассматриваемом случае передача механических возмущений на установленный диффузно-рассеивающий элемент осуществляется через магнитную подвеску (поз. 14, рис. 1), которая фиксирует оптический элемент силами трения [28]. Вибрационное воздействие помехи в зависимости от её спектрального состава может изменять сцепление поверхностей в пятне контакта подвески [36] и привести к дополнительным микро-перемещениям диффузно-рассеивающего элемента. Помимо этого, в процессе передачи механических возмущений на диффузно-рассеивающий элемент будет происходить рассеяние их энергии за счёт действия магнитных сил и сил трения в подвеске. Данное явление [37] будет приводить к нелинейному демпфированию колебаний диффузно-рассеивающего элемента, для изучения которого необходимы дополнительные специальные исследования.

Заключение

Разработана и апробирована методика исследования влияния широкополосных возмущений на оптический тракт цифрового спекл-интерферометра панорамного типа с непрерывным лазером и диффузно-рассеивающим элементом, установленным перед объектом исследования. Методика связана с контролем вибрационного состояния критических элементов оптической схемы при помощи доплеровского вибрметра PDV-100 с одновременным определением видности интерферограмм, записанных спекл-интерферометром. Предложенный подход позволяет найти связь между параметрами вибрационного воздействия на оптическую схему прибора, механическими свойствами конструкции спекл-интерферометра и качеством получаемых в процессе записи интерферограмм. Методика полезна при физическом моделировании и анализе возможных условий применения спекл-интерферометра, для обоснования введения ограничений на условия эксплуатации данного прибора, а также при разработке мероприятий, направленных на повышение его помехоустойчивости.

Исследовано влияние широкополосных возмущений, включая белый и розовый шум, а также периодических ударных воздействий на степень контраста регистрируемых интерферограмм, фиксирующих колебания рабочего колеса малоразмерного ГТД. Показано, что воздействие розового шума и периодических ударов снижает видность интерференционных картин на 30...45%, тогда как белый шум при том же уровне энергетического воздействия практически не нарушал процесса записи. Хотя эффект воздействия розового шума и периодических ударов оказывается сопоставимым по последствиям для интерференционных полос высокого порядка, повышение жёсткости диффузно-рассеивающего элемента позволяет увеличить значение контраста $V^{(l)}$ на 19%. Воздействие же периодических ударных нагрузок для жёстких диффузно-

рассеивающих элементов приводит к снижению видности $V^{(1)}$ и нуждается в дополнительных исследованиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-10066.

Библиографический список

1. Федорченко Д.Г., Кочеров Е.П. Прочностная доводка и устранение основных дефектов ГТД. Самара: Издатель Исакова Т.С. (БИЮР), 2022. 431 с.
2. Стеценко А.А., Стеценко О.А., Королев П.В., Мамонов А.И., Рудко В.В., Соловьев О.Б. Совершенствование оценки технического состояния ГТД и обеспечение их безопасной эксплуатации // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2011. № 4 (27). С. 25-37.
3. Михайлов А.Л. Проектирование и вибродиагностика деталей ГТД на основе исследования объёмного напряжённо-деформированного состояния. Рыбинск: НПО Сатурн: РГАТА, 2005. 213 с.
4. Иванов В.П. Колебания рабочих колёс турбомашин. М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
5. Adams M.L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting. CRC Press, 2010. 476 p.
6. Boyce M.P. Gas turbine engineering handbook. Elsevier Inc., 2011. 1000 p.
7. Басов П.А., Селезнёв В.Г. Несинхронные колебания рабочих колёс турбомашин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5 (47), ч. 2. С. 103-108. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-5-2(47)-103-108
8. Kushner F. Disk vibration – rotating blade and stationary vane interaction // Journal of Mechanical Design. 1980. V. 102, Iss. 3. P. 579-584. DOI: 10.1115/1.3254788
9. Ohashi H. Case study of pump failure due to rotor-stator interaction // International Journal of Rotating Machinery. 1994. V. 1. DOI: 10.1155/s1023621x94000059
10. Srinivasan A.V. Flutter and resonant vibration characteristics of engine blades // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1997. V. 119, Iss. 4. P. 742-775. DOI: 10.1115/1.2817053
11. Балакшин О.Б., Кухаренко Б.Г., Хориков А.А. Идентификация флаттера турбинных лопаток // Проблемы машиностроения и надёжность машин. 2008. № 1. С. 19-24.
12. Сидоренко М.К. Виброметрия газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1973. 224 с.
13. Buzdugan Gh., Mihilescu E., Rades M. Vibration measurement. Dordrecht: Springer, 1986. 347 p. DOI: 10.1007/978-94-017-3645-9
14. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. Т. 7, кн. 1-2. Метод акустической эмиссии. Вибродиагностика / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. 828 с.
15. Еленевский С.Д., Бекбулатов Р.С., Сипухин И.Г. и др. Вибропрочностные испытания охлаждаемых лопаток турбины / В сб.: «Научные основы и методы повышения надёжности и долговечности газотурбинных двигателей». Киев: Наукова думка, 1979. С. 149-155.
16. Petyt M. Fennit element modeling in structural dynamics // Industrial Vibration Modelling. 1987. P. 135-147. DOI: 10.1007/978-94-009-4480-0_9

17. Bertin L., Neri P., Santus C., Guglielmo A., Mariotti G. Analytical investigation of the SAFE diagram for bladed wheels, numerical and experimental validation // Journal of Sound and Vibration. 2014. V. 333, Iss. 19. P. 4771-4788. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.061
18. Gray C. Optical methods of engineering analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 520 p.
19. Lyu L.F., Zhu W.D. Operational modal analysis of rotating structures under ambient excitation using tracking continuously scanning laser doppler vibrometry // Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods. 2022. V. 6. P. 51-58. DOI: 10.1007/978-3-030-76335-0_5
20. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
21. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. A discussion of the theory, practice and application of the techniques. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 330 p.
22. Doval A.F., Trillo C., Cemadas D., Dorrio B.V., Lopez C., Fernandez J.L., Perez-Amor M. Measuring amplitude and phase of vibration with double-exposed stroboscopic TV Holography // Interferometry in Speckle Light. 2000. P. 281-288. DOI: 10.1007/978-3-642-57323-1_35
23. Журавлев О.А., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д., Комаров С.Ю. Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций. Самара: СГАУ, 2005. 143 с.
24. Комаров С.Ю. Разработка помехоустойчивого спекл-интерферометра для определения резонансных частот и форм колебаний высоконагруженных элементов конструкций, систем и агрегатов энергетических установок. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2004. 233 с.
25. Watson R., Downey O. The little red book of acoustics: A practical guide. London: Unknown, 2013. 306 p.
26. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.
27. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
28. Ивченко А.В., Жужукин А.И. Разработка системы регистрации спекл-интерферограмм колеблющегося объекта без виброизоляции // Тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (16-18 сентября, 2020 г., Самара). Самара: Самарский университет, 2020. С. 72-73.
29. Ивченко А.В., Сафин А.И. Совершенствование методики регистрации колебаний колес ГТД при помощи помехоустойчивого цифрового спеклинтерферометра // Тезисы докладов шестой международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (21-23 сентября, 2022 г., Самара). Самара: Самарский университет, 2022. С. 155-157.
30. Жужукин А.И. Устройство для исследования форм колебаний: патент РФ № 71429; опубл. 10.03.2008; бюл. № 7.
31. Moeller K.D. Optics. New York: Springer-Verlag, 2007. 455 p. DOI: 10.1007/978-0-387-69492-4
32. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: URSS, 2009. 635 с.
33. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2006. 8 с.
34. Тактаров Н.Г. Справочник по высшей математике для студентов вузов. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. 880 с.

35. Palazzolo A. Vibration theory and applications with finite elements and active vibration control. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 976 p.

36. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

37. Chicharro J.M., Bayon A., Salazar F. Measurement of damping in magnetic materials by optical heterodyne interferometry // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2004. V. 268, Iss. 3. P. 348-356. DOI: 10.1016/s0304-8853(03)00546-8

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BROADBAND MECHANICAL DISTURBANCES ON THE QUALITY OF RECORDING INTERFERENCE PATTERNS OF GTE-WHEEL OSCILLATIONS USING A DIGITAL SPECKLE PATTERN INTERFEROMETER

© 2024

A. V. Ivchenko Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Engine Production Department; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; fgrt@yandex.ru

A. I. Safin Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; safin.ai@ssau.ru

The effect of broadband disturbances on the operation of a noise-immune digital speckle pattern interferometer with a continuous wave laser emitter and a diffuse-scattering element arranged in front of an oscillating turbine wheel has been studied. Visibility dependences of the recorded interference patterns were obtained under the action of different types of artificially created disturbances. It is shown that the most dangerous mechanical disturbances for the operation of a speckle pattern interferometer are periodic noise and pink noise, whereas white noise and natural vibrations of the floor in the room where the experimental setup was accommodated do not significantly influence the quality of the information recorded by the interferometer. This article analyzes the influence of the mechanical properties of the diffuse-scattering element arranged in the speckle pattern interferometer on the quality of the obtained interference patterns. A relationship between the growth of forced tangential oscillations of the diffuse-scattering element and a decrease in the contrast of interference fringes was noted. In this case, an increase in the thickness of the organic glass plate of the diffuse-scattering element up to 8 mm leads to the neutralization of the pink noise action on the speckle pattern interferometer operation. At the same time, the effect of periodic noises decreases the contrast of interference patterns recorded for the cases of using 5 mm and 8 mm thick organic glass plates.

Gas turbine engine; the bladed wheel vibration; registration; speckle-interferometer; mechanical perturbation; interference pattern; quality; visibility

Citation: Ivchenko A.V., Safin A.I. Investigation of the influence of broadband mechanical disturbances on the quality of recording interference patterns of GTE-wheel oscillations using a digital speckle pattern interferometer. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 1. P. 160-176. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-160-176

References

1. Fedorchenko D.G., Kocherov E.P. *Prochnostnaya dovodka i ustranenie osnovnykh defektov GTD* [Strength development and elimination of the main defects of gas turbine engines]. Samara: Isakova T.S. (BIYuR) Publ., 2022. 431 p.

2. Stetsenko A.A., Stetsenko O.A., Korolev P.V., Mamonov A.I., Rudko V.V., Solovyov O.B. Improvement of assessment of technical state of GTE and ensuring their safe operation. *Vibratsiya Mashin: Izmerenie, Snizhenie, Zashchita*. 2011. No. 4 (27). P. 25-37. (In Russ.)

3. Mikhaylov A.L. *Proektirovanie i vibrodiagnostika detaley GTD na osnove issledovaniya ob"emnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Design and vibration-based diagnostics of gas turbine engine parts based on the study of three-dimensional stress-strain state]. Rybinsk: NPO Saturn: RGATA Publ., 2005. 213 p.
4. Ivanov V.P. *Kolebaniya rabochikh koles turbomashin* [Vibrations of turbo-machine impellers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 224 p.
5. Adams M.L. *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*. CRC Press, 2010. 476 p.
6. Boyce M.P. *Gas turbine engineering handbook*. Elsevier Inc., 2011. 1000 p.
7. Basov P.A., Seleznev V.G. Nonsynchronous vibrations of turbomachinery bladed discs. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No. 5 (47), part 2. P. 103-108. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-5-2(47)-103-108
8. Kushner F. Disk vibration – rotating blade and stationary vane interaction. *Journal of Mechanical Design*. 1980. V. 102, Iss. 3. P. 579-584. DOI: 10.1115/1.3254788
9. Ohashi H. Case study of pump failure due to rotor-stator interaction. *International Journal of Rotating Machinery*. 1994. V. 1. DOI: 10.1155/s1023621x94000059
10. Srinivasan A.V. Flutter and resonant vibration characteristics of engine blades. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1997. V. 119, Iss. 4. P. 742-775. DOI: 10.1115/1.2817053
11. Balakshin O.B., Kukhareno B.G., Khorikov A.A. Identification of turbine blade flutter. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2008. V. 37, Iss. 1. P. 16-20. DOI: 10.3103/S1052618808010056
12. Sidorenko M.K. *Vibrometriya gazoturbinnnykh dvigateley* [Vibration analysis of gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 224 p.
13. Buzdugan Gh., Mihilescu E., Rades M. *Vibration measurement*. Dordrecht: Springer, 1986. 347 p. DOI: 10.1007/978-94-017-3645-9
14. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik v 7 t. T. 7, kn. 1-2. Metod akusticheskoy emissii. Vibrodiagnostika / pod red. V.V. Klyueva* [Nondestructive testing: Handbook. In 7 volumes. V. 7. Book 1-2. Acoustic emission method. Vibration-based diagnostics / ed. by V.V. Klyuev]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 828 p.
15. Elenevskiy S.D., Bekbulatov R.S., Sipukhin I.G. et al. Vibroprochnostnye ispytaniya okhlazhdaemykh lopatok turbiny. *V sb.: «Nauchnye osnovy i metody povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti gazoturbinnnykh dvigateley»*. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1979. P. 149-155. (In Russ.)
16. Petyt M. Fennit element modeling in structural dynamics. *Industrial Vibration Modelling*. 1987. P. 135-147. DOI: 10.1007/978-94-009-4480-0_9
17. Bertin L., Neri P., Santus C., Guglielmo A., Mariotti G. Analytical investigation of the SAFE diagram for bladed wheels, numerical and experimental validation. *Journal of Sound and Vibration*. 2014. V. 333, Iss. 19. P. 4771-4788. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.061
18. Gray C. *Optical methods of engineering analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 520 p.
19. Lyu L.F., Zhu W.D. Operational modal analysis of rotating structures under ambient excitation using tracking continuously scanning laser doppler vibrometry. *Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods*. 2022. V. 6. P. 51-58. DOI: 10.1007/978-3-030-76335-0_5
20. Francon M. *La granularite laser (spekle) et ses applications en optique*. Paris: Masson, 1978. 132 p.
21. Jones R., Wykes C. *Holographic and speckle interferometry. A discussion of the theory, practice and application of the techniques*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 330 p.

22. Doval A.F., Trillo C., Cemadas D., Dorrio B.V., Lopez C., Fernandez J.L., Perez-Amor M. Measuring amplitude and phase of vibration with double-exposed stroboscopic TV Holography. *Interferometry in Speckle Light*. 2000. P. 281-288. DOI: 10.1007/978-3-642-57323-1_35

23. Zhuravlev O.A., Shaposhnikov Yu.N., Shcheglov Yu.D., Komarov S.Yu. *Primenenie metodov golograficheskoy i spekl-interferometrii dlya issledovaniya vibratsii i shuma mekhanicheskikh konstruktsiy* [Application of holographic and speckle interferometry methods for studying vibration and noise of mechanical structures]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2005. 143 p.

24. Komarov S.Yu. *Razrabotka pomekhoustoychivogo spekl-interferometra dlya opredeleniya rezonansnykh chastot i form kolebaniy vysokonagruzhennykh elementov konstruktsiy, sistem i agregatov energeticheskikh ustanovok. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a noise-immune speckle interferometer for determining resonant frequencies and vibration modes of high- load structural elements, systems and units of power plants. Dissertation for the Candidate Degree (Engineering). Samara]. Samara, 2004. 233 p.

25. Watson R., Downey O. *The little red book of acoustics: A practical guide*. London: Unknown, 2013. 306 p.

26. Kharkevich A.A. *Spektry i analiz* [Spectra and analysis]. Moscow: Knizhnyy Dom «LIBROKOM» Publ., 2009. 240 p.

27. Ostrovskiy Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V. *Golograficheskaya interferometriya* [Holographic interferometry]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 339 p.

28. Ivchenko A.V., Zhuzhukin A.I. The system development for digital recording of speckle-interferograms of an oscillating object without vibration isolation. *Proceedings of the International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2020 (September, 16-18, 2020, Samara, Russia)*. DOI: 10.1109/dvm49764.2020.9243896

29. Ivchenko A.V., Safin A.I. The technique improvement for GTE-wheel oscillation recording by the noise-proof digital speckle pattern interferometer. *Proceedings of the International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2022 (September, 21-23, 2022, Samara, Russia)*. DOI: 10.1109/dvm55487.2022.9930910

30. Zhuzhukin A.I. *Ustroystvo dlya issledovaniya form kolebaniy* [Device for studying vibration modes]. Patent RF, no. 71429, 2008. (Publ. 10.03.2008, bull. no. 7)

31. Moeller K.D. *Optics*. New York: Springer-Verlag, 2007. 455 p. DOI: 10.1007/978-0-387-69492-4

32. Timoshenko S., Woinowsky-Kriger S. *Theory of plates and shells*. McGraw-Hill Book Company, 1959. 591 p.

33. GOST 8.207-76. State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct measurements with multiple observations. Methods of processing the results of observations. Basic principles. Moscow: Standartinform Publ., 2006. 8 p. (In Russ.)

34. Taktarov N.G. *Spravochnik po vysshey matematike dlya studentov vuzov* [Handbook on higher mathematics for university students]. Moscow: Knizhnyy Dom «LIBROKOM» Publ., 2019. 880 p.

35. Palazzolo A. *Vibration theory and applications with finite elements and active vibration control*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 976 p.

36. Kragel'skiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p.

37. Chicharro J.M., Bayon A., Salazar F. Measurement of damping in magnetic materials by optical heterodyne interferometry. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004. V. 268, Iss. 3. P. 348-356. DOI: 10.1016/s0304-8853(03)00546-8