

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГИСТРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ КОЛЕС ГТД ПРИ ПОМОЩИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ЦИФРОВОГО СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПАНОРАМНОГО ТИПА

Ивченко А.В.,
Сафин А.И.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086,
Российская Федерация

artursafin1988@gmail.com

В работе описана мобильная лазерная система на базе помехоустойчивого спекл-интерферометра для изучения связанных колебаний рабочих колес на этапе доводки ГТД. Исследовано влияние механических свойств элементов оптической схемы спекл-интерферометра при записи информации без виброизоляции. Отмечено улучшение качества получаемых спекл-интерферограмм при увеличении жесткости конструкции диффузно-рассеивающего элемента спекл-интерферометра.

Ключевые слова: рабочее колесо; модальный анализ; форма колебательная; спекл-интерферометр; оптический диффузор; интерферограмма; видимость

1 Введение

Высокие требования к безопасности полётов в гражданской авиации [1, 2] приводят к необходимости повышения надёжности летательных аппаратов и газотурбинных двигателей (ГТД). Одна из проблем надёжности газотурбинных двигателей связана с обеспечением виброустойчивости элементов роторных систем [3, 4], таких как рабочие колеса компрессора и турбины [5]. Для предотвращения разрушения лопаточных колёс необходимо исследование их вибрационного состояния с целью нейтрализации негативных резонансных явлений при эксплуатации двигателя [6, 8]. В реальных условиях лопаточные колёса совершают связанные колебания, когда их диски с лопастями составляют единое целое [9]. В этом случае спектр колебаний лопаточных колёс будет отличаться от спектров диска и лопастей. Такое поведение при вибрации рабочих колёс определяет интерес к изучению природы вибрации с целью оптимизации работы ГТД и снижения вибрационных нагрузок

[5, 9]. Согласно [9, 10] связанные колебания лопаточных колёс описываются набором собственных частот и форм колебаний с оценкой уровней амплитуд возбуждаемых виброперемещений и связанных с ними вибрационных напряжений. Полученные данные используются для проведения работ по доводке ГТД [10], а также для верификации численных моделей исследуемых технических изделий [11].

Традиционно эта задача решается с помощью вибромониторинга [12, 13], когда сенсорная система устанавливается на поверхности исследуемого объекта. Датчики фиксируют вибрацию в заданных точках изделия, предоставляя исследователю информацию о частоте колебаний и локальной амплитуде колебаний поверхности. Однако низкое пространственное разрешение сенсорного метода определяет развитие панорамных оптических методов измерения [14, 16], способных получать как качественную, так и количественную информацию о вибрации объекта с высоким

пространственным и временным разрешением.

Спекл-интерферометрия является одним из методов, обеспечивающих регистрацию вибрации оптически грубой поверхности [17–19]. Метод обладает высокой производительностью процесса измерения и регистрирует поля виброперемещений с субмикроскопической точностью [20, 21]. Поэтому метод используется при анализе вибраций различных механических конструкций, в том числе крупногабаритных элементов ГТД типа турбинных колес [22, 23].

Традиционно лопастное колесо размещают на оптическом столе с изоляцией от вибрации и облучают непрерывным лазером спекл-интерферометра [18, 19]. Одномодовый непрерывный лазер снимает ограничения на размеры мишени и снижает стоимость лазерной системы [19]. Тем не менее современные оптические столы запрещают размещение там полноразмерных ГТД-элементов. Эта проблема определяет высокий спрос на недорогие, помехозащищённые цифровые спекл-интерферометры, способные регистрировать интерференционную картину без виброзащиты в условиях непрерывного лазерного излучения [23].

Спекл-интерферометры такого типа были предложены в [22, 23]. Для нейтрализации вибрации в этих системах применялся специальный метод, обеспечивающий накопление информации и статистическую обработку данных [24]. Также для этой цели в оптическую схему спекл-интерферометров был включен диффузно-рассеивающий элемент (оптический диффузор), который имел связь с исследуемой мишенью [22, 23, 25–28]. Это позволило регистрировать интерференционную картину при размещении оптических элементов интерферометра без виброизоляции. Таким образом, мы имеем возможность отделить исследуемый объект от приёмно-передающего блока интерферометра, что

позволяет разработать как помехозащищённую, так и мобильную лазерную систему для эксплуатации в полевых условиях [23, 28].

Согласно [23], дальнейшее совершенствование разработанного спекл-интерферометра невозможно без оптимизации свойств его оптической схемы. В частности, важным элементом оптической схемы является диффузно-рассеивающий элемент, участвующий в формировании объектного и опорного лучей интерферометра [22, 23, 25]. Таким образом, исследование влияния его колебательных свойств на качество регистрируемой интерференционной картины может стать ключевым моментом при проектировании таких систем.

2 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Установка состоит из передвижного помехозащищённого цифрового спекл-интерферометра (см. поз. 1–19 на рисунке 1) и лазерного доплеровского виброметра (ПДВ-100, поз.20 на рисунке 1).

В эксперименте цифровой спекл-интерферометр обеспечивал регистрацию интерферограмм (см. рисунок 2), а ПДВ-100 использовался для проверки вибрации оптических элементов интерферометра. Согласно [23, 25] спекл-интерферометр имеет приёмно-излучающий блок, размещённый на подвижном геодезическом штативе. Этот блок включает DPSS, одночастотный, непрерывный лазер с диодной накачкой (LCS-DTL-317 с длиной волны $\lambda=532$ нм, мощностью $P<0,055$ Вт и длиной когерентности 50 м), объектив микроскопа (Lomo 20X) и ПЗС-камеру (WAT-902 H 300 с разрешением 640*480 пикс) с объективом (Pentax H6Z810). Обработку изображения осуществляет компьютер, подключенный к ПЗС-камере.

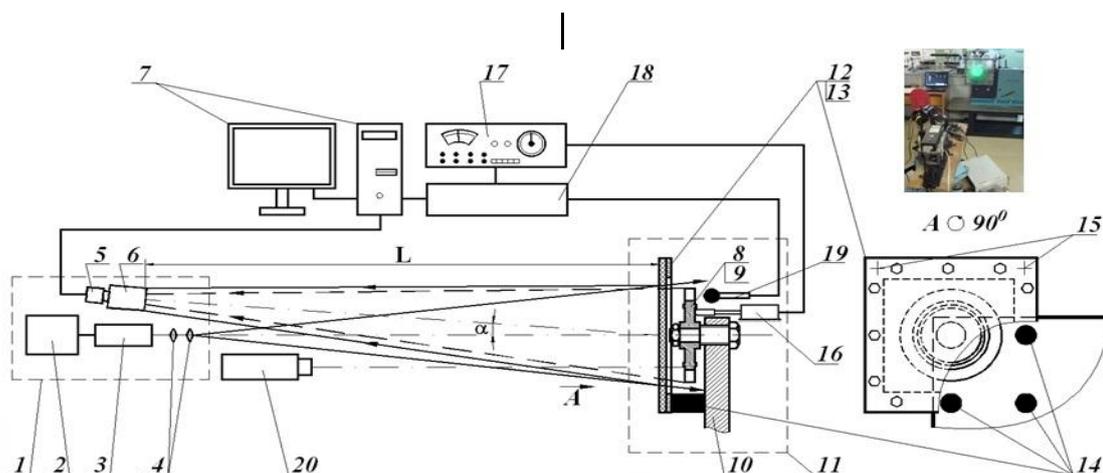


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для исследования оптической конструкции мобильного помехозащищённого цифрового спекл-интерферометра

- 1 – подвижная геодезическая тренога; 2 – источник питания твердотельного лазера с диодной накачкой (DPSS-лазер); 3 – генерирующий излучатель DPSS-лазера; 4 – объектив микроскопа; 5 – ПЗС-камера; 6 – объектив камеры; 7 – компьютер; 8 – лопастное колесо (предмет); 9 – болтовое соединение; 10 – голографическая подставка; 11 – основание; 12, 13 – диффузно-рассеивающий элемент; 14 – точки магнитного подвеса; 15 – дополнительные точки подвески; 16 – механический пьезоэлектрический привод; 17 – генератор звуковой частоты; 18 – осциллограф; 19 – микрофон; 20 – лазерный доплеровский виброметр

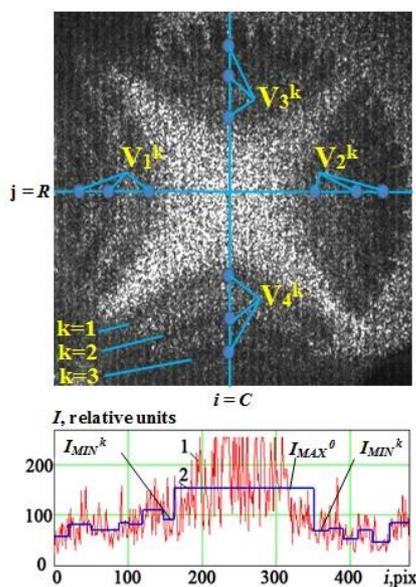


Рисунок 2. Определение качества интерферограммы по распределению интенсивности излучения в интерференционной картине

- 1 – распределение интенсивности излучения в спекл-картине; 2 – аппроксимация низкочастотной составляющей распределения интенсивности излучения интерферограммы; I_{MAX}^0 – максимальная интенсивность излучения для яркой полосы нулевого порядка; I_{MIN}^k – минимум интенсивности излучения для тёмной полосы k-го порядка; $V_1^k, V_2^k, V_3^k, V_4^k$ – видимости спекл-интерферограммы для темных полос k-го порядка

Для регистрации интерферограммы в качестве объекта исследования было выбрано колесо турбины диаметром около 280 мм. Оно имело 45 лопаток с аэродинамическим профилем длиной 25 мм. Турбинное колесо было установлено на голографической подставке и прикручено к ней болтами. Голографический стенд был расположен на металлическом основании без изоляции от вибрации и установлен на расстоянии $L=2$ м от приёмно-излучающего блока спекл-интерферометра. Для улучшения отражательной способности турбинного колеса и формирования предметного луча на мишень наносилось два типа оптических покрытий [23]. Одно из них использовалось для колёсного диска, а другое покрытие наносилось на лопасти. Это позволило увеличить коэффициент диффузного отражения до $R_0=0,7$ и выровнять отражённое излучение от диска и лопаток турбины на ПЗС-датчике [23]. В эксперименте объект возбуждался механическим пьезоэлектрическим приводом на частоте, заданной генератором звуковых частот (ГЗ-56/1). Турбинное колесо настраивалось на

резонанс по фигурам Лиссажу, наблюдаемым на экране осциллографа (PCSU1000). Эти фигуры были сформированы сигналом микрофона и сигналом генератора звуковой частоты.

Для формирования опорного луча в спекл-интерферометре диффузно-рассеивающий элемент располагался вблизи турбинного колеса на расстоянии 5-10 мм. Здесь диффузно-рассеивающий элемент был соединён с голографической подставкой посредством магнитного подвеса [23].

Диффузно-рассеивающий элемент включал пластину из оргстекла площадью 410*410 мм и толщиной $d=3, 5$ и 8 мм. Пластина из оргстекла крепилась к стальной раме, расположенной по её периметру. Также пластина из оргстекла имела на внешней поверхности светопрозрачное покрытие с коэффициентом диффузного отражения $R_D=0,25-0,35$ [22-28].

При регистрации интерферограмм спекл-интерферометром лазерный доплеровский виброметр регистрировал скорости колебаний в некоторых точках поверхности диффузно-рассеивающего элемента. Это позволило оценить уровень возмущений диффузно-рассеивающего элемента при влиянии случайных воздействий, определить спектральные составляющие [29] его колебаний, а также выявить влияние свойств диффузно-рассеивающего элемента на качество регистрируемых интерферограмм.

Согласно [30], качество интерферограммы можно оценить по видимости интерференционной картины. Если локальный контраст регистрируемой интерферограммы изменяется, то определяется значение видимости k -го порядка тёмных полос в определённой точке [23]:

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

где I_{MAX}^{k-1} – максимум интенсивности излучения яркой полосы $(k-1)$ -го порядка; I_{MIN}^k — минимум интенсивности излучения для тёмной полосы k -го

порядка; N — максимальный порядок тёмных полос на интерферограмме. Для сравнения интерферограмм с неравномерным контрастом на k -м порядке интерференции применялся интегральный параметр, предложенный в [23]:

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

Здесь V_m^k — видимость тёмных полос k -го порядка в m -й точке спекл-интерферограммы, рассчитанная по низкочастотным компонентам интенсивности в строке ($j=R$) и столбце ($i=C$) изображения (см. рисунок 2).

Совместное применение спекл-интерферометра и лазерного доплеровского виброметра позволяет получить дополнительную информацию о работе оптических систем в условиях вибрационного воздействия. Таким образом, разработанная экспериментальная установка может быть полезна в будущем для оптимизации конструкции спекл-интерферометров в полевых условиях. Также полученная информация будет использована для усовершенствования методики регистрации колебаний ГТД-колес.

3 Результаты и обсуждение

В статье исследована работа мобильного помехозащищённого цифрового спекл-интерферометра с диффузно-рассеивающим элементом, имеющим несколько сменных пластин из оргстекла. Эти пластины имели толщину $d=3, 5, 8$ мм. Такой выбор был обусловлен тем, что толщина (d) пластины из плексигласа влияла не только на жёсткость диффузно-рассеивающего элемента, но и на его собственные частоты [31].

Полученные результаты исследований представлены на рисунках 3-8. На рисунке 3 показаны резонансные колебания турбинного колеса на частоте 3980 Гц. В

этом случае турбинное колесо возбуждается в режиме двух модальных диаметров [9]. В центральной части диска колеса (см. поз.1 на рисунке 3) имеется

узловая зона, охваченная яркой интерференционной полосой нулевого порядка.

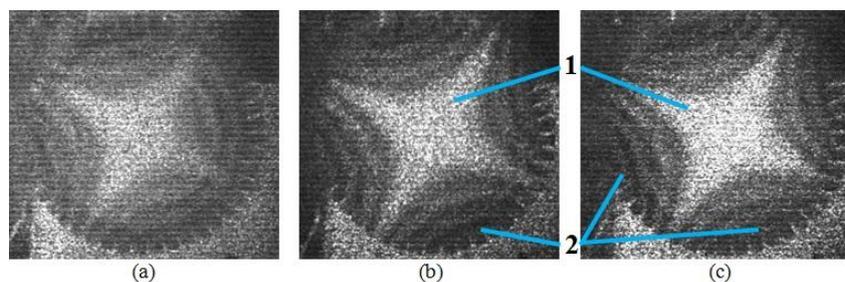


Рисунок 3. Типичные интерферограммы турбинного колеса, снятые с использованием различных диффузно-рассеивающих элементов с толщиной пластины из плексигласа (d): (a) d=3 мм, (b) – 5 мм, (c) – 8 мм
1 – полоса интерференционной картины нулевого порядка (узловая зона турбинного колеса); 2 – пучность; частота возбуждения турбинного колеса $f \approx 3980$ Гц; мощность лазерного излучения $P=0,055$ Вт

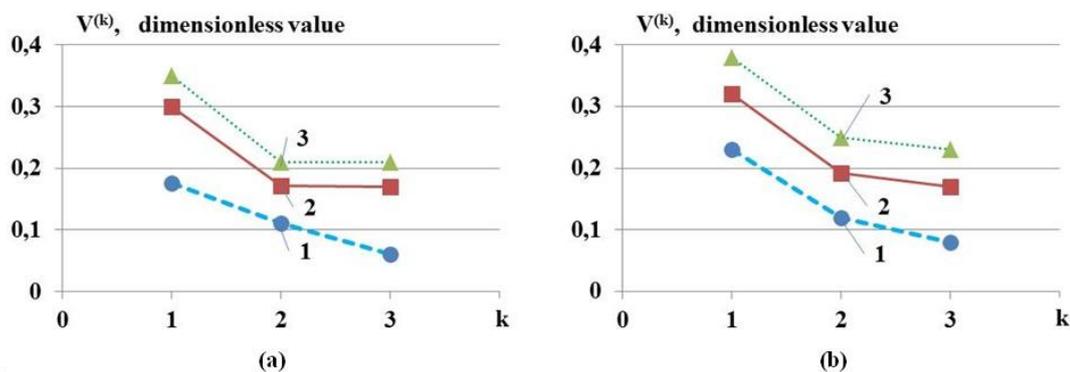


Рисунок 4. Изменение контраста ($V^{(k)}$) интерференционных полос на интерферограмме в зависимости от порядка интерференционной полосы при регистрации спекл-изображения с различными диффузно-рассеивающими элементами, имеющими различную толщину оргстеклянной пластины (d) в течении 1 часа (a) и 24 часов (b) после их установки: 1 – d=3 мм; 2 – 5 мм; 3 – 8 мм

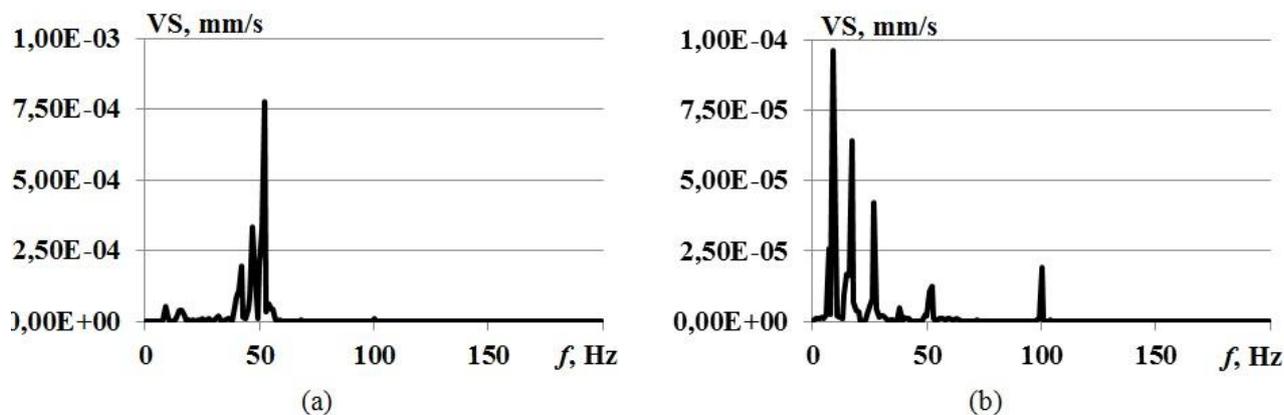


Рисунок 5. Спектры виброскорости диффузно-рассеивающих элементов, возбуждаемые случайными механическими возмущениями при регистрации интерферограмм. Толщины пластин из оргстекла диффузно-рассеивающего элемента: (a) – d=3 мм, (b) – 8 мм

В то же время на периферии рабочего колеса расположены четыре пучности (см. поз. 2 на рисунке 3). Эти пучности покрыты наборами темных и светлых интерференционных полос k -го порядка, демонстрирующих увеличение в них виброперемещения поверхности. В пучности тёмные и светлые интерференционные полосы охватывают как лопатки, так и диск турбинного колеса, из чего видно, что колесо турбины колеблется как единое целое, образуя связанные колебания [9].

Интерферограммы, представленные на рисунке, демонстрируют рост контраста интерференционной картины с увеличением толщины плексигласовой пластины (d) диффузно-рассеивающего элемента. Наилучший результат по контрасту интерференционных полос был достигнут для диффузно-рассеивающего элемента с толщиной пластины из оргстекла около $d=8$ мм (рисунок 3, в). Это подтверждается дополнительным изучением видимости интерференционных картин, зарегистрированных через 1 час и через 24 часа после установки диффузно-рассеивающих элементов на голографическом стенде с помощью магнитной подвески. Такая процедура позволила оценить влияние на качество регистрируемых интерферограмм эффекта демпфирования колебаний диффузно-рассеивающего элемента после его установки. Согласно этой методике, для диффузно-рассеивающего элемента с толщиной пластины из оргстекла $d=3, 5$ и 8 мм были измерены видимости для полос k -го порядка в регистрируемой интерференционной картине (рисунок 4).

При использовании диффузно-рассеивающих элементов с более толстыми пластинами из оргстекла были получены более контрастные интерференционные картины с видимостью до $0,38$ (рисунок 4). В этих условиях увеличивается контраст для всех порядков интерференционных полос. При

этом уменьшается неравномерность локального контраста интерференционных картин (рисунок 3). Однако замедление роста качества интерференционной картины с ростом d (см. кривые 1-3 на рисунке 4) свидетельствует о приближении оптической системы интерферометра к оптимальному состоянию по выбранному параметру.

С другой стороны, рисунки 4,а и 4,б показывают, что наилучшее качество интерферограммы, регистрируемой спекл-интерферометром, может быть достигнуто через 24 часа после установки диффузно-рассеивающего элемента на магнитной подвеске. Это происходит за счет демпфирования вибрации диффузно-рассеивающего элемента, вызванной ударом при монтаже. В то же время попытка записать интерферограмму сразу после установки диффузно-рассеивающего элемента приводит к неудаче из-за возмущений оптического пути интерферометра. Это показывает необходимость исследования вибрационного состояния помехозащищённого цифрового спекл-интерферометра при воздействии случайных возмущений и, в частности, колебаний диффузно-рассеивающего элемента.

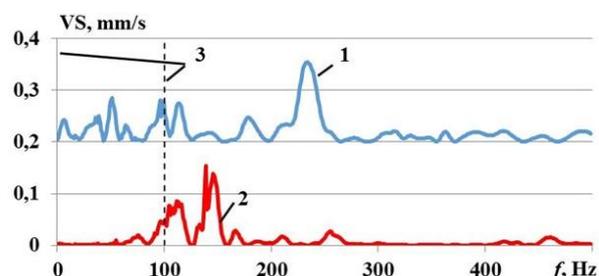


Рисунок 6. Спектры скоростей колебаний диффузно рассеивающих элементов, возбуждаемых ударом. Толщины плексигласовой пластины диффузно-рассеивающего элемента: 1 – $d=3$ мм, 2 – 8 мм, 3 – ширина полосы случайных возмущений. Кривая (1) смещена относительно кривой (2) на $0,2$ мм/с вверх

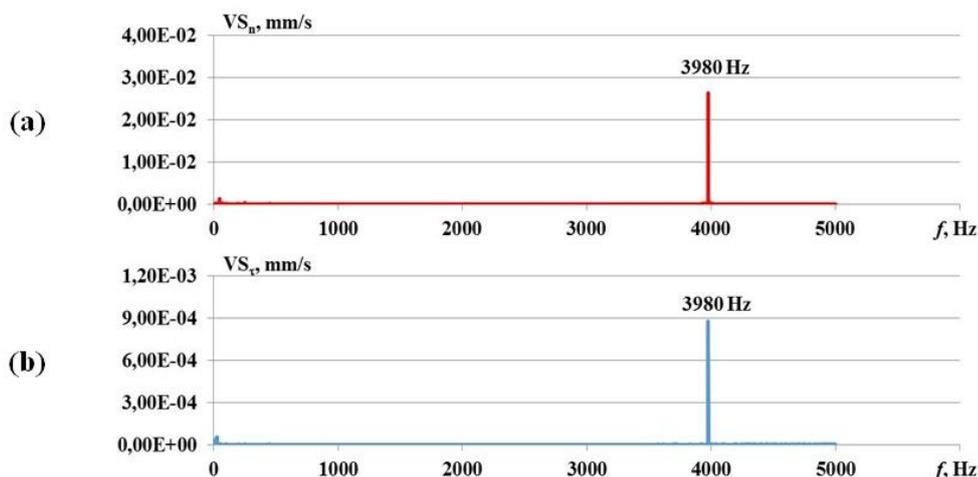


Рисунок 7. Спектры виброскорости диффузно-рассеивающих элементов при возбуждении турбинного колеса (a) – нормальная компонента, (b) – тангенциальная компонента. Толщина плексигласовой пластины диффузно-рассеивающего элемента 3 мм

Вибрацию диффузно-рассеивающего элемента под действием случайных механических возмущений измеряли с помощью лазерного доплеровского виброметра (LDV). Согласно [16, 29], LDV регистрировал временной ряд виброскорости, который можно легко представить спектральными составляющими посредством преобразования Фурье [32]. Полученные спектры виброскорости в центре диффузно-рассеивающих элементов с толщиной пластины из оргстекла $d=3$ и 8 мм представлены на рисунке 5. В естественных условиях эти спектры показывают, что пластина из плексигласа с $d=3$ колеблется больше, чем пластина с $d=8$ мм. При этом спектры локализованы в полосе частот 100 Гц и связаны с вибрациями здания, в котором находится наша лаборатория. С другой стороны, наблюдаемые составляющие спектра колебаний определяются собственными частотами диффузно-рассеивающего элемента и его механическими характеристиками.

Для того чтобы раскрыть это явление был проведён анализ режимов вибрации. В этом случае диффузно-рассеивающие элементы были присоединены к голографической подставке магнитной подвеской, а их возбуждение было

реализовано ударным методом [33]. Записанные спектры собственных частот диффузно-рассеивающих элементов представлены на рисунке 6. Здесь видно, что собственные частоты диффузно-рассеивающего элемента смещаются в высокочастотную область с увеличением толщины его плексигласовой пластины. Это подтверждается данными аналитических исследований, выполненных для плоских пластин, закреплённых на раме [31].

Параллельно исследовались колебания диффузно-рассеивающего элемента при возбуждении турбинного колеса. Зарегистрированные спектры виброскорости показывают наличие на поверхности диффузно-рассеивающего элемента высокочастотной составляющей, связанной с резонансной частотой объекта (см. рисунок 7). Очевидно, что передача вибрации от возбуждённого колеса турбины к диффузно-рассеивающему элементу возможна через магнитный подвес. Однако LDV-сканирование диффузно-рассеивающего элемента показало наличие на его поверхности участков с более интенсивной вибрацией (рисунок 8). Эти области располагались напротив пучностей турбинного колеса (кривая 1 на рисунке 8). При этом участки поверхности напротив узлов и участки

поверхности вне турбинного колеса имели равные колебания (кривые 2, 3 на рисунке 8). Это позволяет предположить наличие дополнительной связи между возбуждаемым колесом турбины и диффузно-рассеивающим элементом.

Кроме того, эта связь способна обеспечить синхронизацию колебаний между этими элементами [34].

Таким образом, полученные результаты объясняют наблюдаемое улучшение качества интерферограммы (см. рисунок 3) и могут быть использованы для оптимизации конструкции помехозащищённого цифрового спекл-интерферометра.

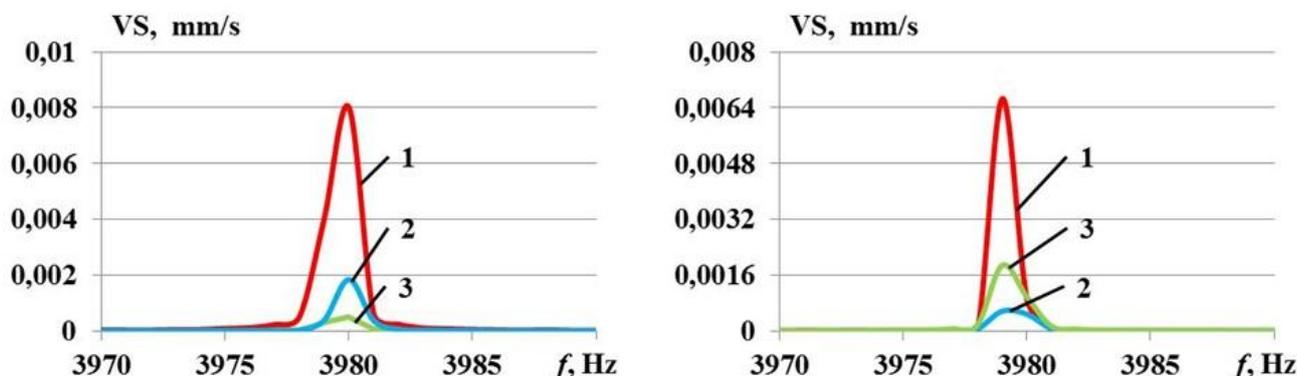


Рисунок 8. Результаты сканирования различных участков поверхности диффузно-рассеивающих элементов лазерным доплеровским виброметром при возбуждении турбинного колеса

- 1 – область диффузно-рассеивающих элементов, расположенная напротив пучности турбинного колеса;
 - 2 – область диффузно-рассеивающих элементов, расположенная вне турбинного колеса;
 - 3 – область диффузно-рассеивающих элементов, расположенная напротив узловой зоны турбинного колеса.
- Толщина плексигласовых пластин диффузно-рассеивающих элементов $d=3$ мм (а) и $d=8$ мм (б)

4 Заключение

Проведённое исследование указывает на один из путей улучшения качества регистрируемых интерференционных картин с помощью спекл-интерферометра с непрерывным лазером, работающего без изоляции от вибрации. Оптимизация конструкции спекл-интерферометра позволяет повысить контрастность регистрируемых интерферограмм более чем на 50%. Результат позволяет эффективно использовать разработанный метод регистрации сопряжённых колебаний колёс ГТД.

5 Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта Самарской области в области науки и техники 2020 г. и Минобрнауки России (проект № 0777-

2020-0015). Также авторы выражают благодарность Жужукину А.И. (сотрудник Инжинирингового центра ПАО ОДК «Кузнецов») за обсуждение и ценные советы.

Список использованных источников

- [1] E. Zio, M. Fan, Z.Zeng, R. Kang, “Application of reliability technologies in civil aviation: Lessons learnt and perspectives”, Chinese Journal of Aeronautics, vol. 32, i.1: 2019., pp.143–158
- [2] A.F. Pashchenko* V.I. Akhrameev, “On Some Approaches to Development of Flight Safety Control System for Experimental and Civil Aviation”, IFAC PapersOnLine, i.54-13, 2021, pp.704–709.
- [3] C-W. Lee, Vibration Analysis of Rotors, Heidelberg: Springer Netherlands, 1993.
- [4] M. L. Adams, Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting, 2nd ed., Boca Roton – London – New-York: CRC Press, 2010.
- [5] M. P. Boyce, Gas Turbine Engineering Handbook. 4th ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2012.
- [6] L. Bertini, P.Neri, C.Santus, A.Guglielmo, G.Mariotti, “Analytical investigation of the SAFE diagram for bladed wheels, numerical and experimental validation”, Journal of Sound and Vibration, vol.333,2014, pp.4771–4788.

- [7] A.V. Kochergin, N.V. Pavlova, K.A. Valeeva, "Vibroacoustic Control of Technical Conditions of GTE", *Procedia Engineering*, vol.150, 2016, pp.363-369.
- [8] P. Neri, "Bladed wheels damage detection through Non-Harmonic Fourier Analysis improved algorithm", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 88, 2017, pp.1-8.
- [9] Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин - М.: Машиностроение, 1983.
- [10] Вибропрочностные испытания охлаждаемых лопаток турбины/ С.Д. Еленевский, Р.С Бекбуланов., И.Г. Сипухин и др // В сборнике "Научные основы и методы повешения надежности и долговечности газотурбинных двигателей" -Киев.: Накуова думка, 1979. С.149-155.
- [11] Industrial Vibration Modelling, J. Caldwell, R. Bradley, (Eds.) Heidelberg: Springer Netherlands, 1987.
- [12] Gh. Buzdugan, E. Mihăilescu, M. Rades, *Vibration measurement*, Heidelberg: Springer Netherlands, 1986.
- [13] Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. - 2-е изд., испр. - М.: Машиностроение, 2006. - 829 с.: ил.
- [14] C. Gray, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge – New-York – Melbourn:Cambridge University Press, 1998.
- [15] Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, N. William and Jr. Sharpe (Eds.), New-York: Springer, 2008.
- [16] Rotating Machinery, optical methods & scanning LDV methods, Vol. 6 in Proceedings of the 37th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics, C. Niezrecki, J. Baqersad, D. Di Maio (Eds.), Springer, 2019.
- [17] M.M.Franson, *Speckle optics*, Moscow: Mir, 1980.
- [18] R Jones, C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry. A discussion of the theory,practice and application of the techniques*, Cambridge – New-York – Melbourn:Cambridge University Press 1983.
- [19] *Interferometry in speckle light: theory and applications*, P. Jacquot, J.-M. Fournier (Eds.), Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [20] D.I.Farrant, J.N.Petzing, J.R.Tyrer, "Geometrically qualified ESPI vibration analysis of an engine", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 41, i. 4, 2004, pp. 659-671.
- [21] X. Huang, W. Guo, R. Yu, X. Wang, "Real-time high sensibility vibration detection based on phase correlation of line speckle patterns",*Optics & Laser Technology*, vol. 148,, 2022, pp. 1-6.
- [22] N. D. Bystrov, A. I. Zhuzhukin, "Speckle-interferometry in the Investigation of Large-size Gas Turbine Engine Structures Vibration", *Procedia Engineering*, vol. 176, 2017., pp. 471-475.
- [23] A.V.Ivchenko, A. I. Zhuzhukin, "The system development for digital recording of speckle-interferograms of an oscillating object without vibration isolation", 2020, International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM 2020),pp 1-8.
- [24] Применение методов голографической и спекл-интерерометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций/Д.С. Еленевский, О.А. Журавлев, Ю.Н. Шапошников и др. -Самара: Изд.-во СГАУ, 2005.
- [25] Patent Application Publication RU No. 71429 International Class G 01 H 9/00 Device for investigation of Vibration Modes. inventor: A.I. Zhuzhukin. Filed- 14.09.2007.
- [26] O.A. Zhuravliov, A.V. Ivchenko, A.I. Zhuzhukin, S.Yu. Komarov, Yu. N. Shaposhnikov, Yu. D. Shcheglov, "The Noiseproof Digital Speckle Pattern Interferometer for Vibration Modes Study to Industrial Demands", in Proceeding of International Conference on Application for Image based Measurements, Ulm: Dantec Dynamics GMB, 2012, 10pp.
- [27] An. I. Zhuzhukin and V. A. Solyannikov, "Method of reducing speckle-interferometer sensitivity for the study of turbomachine elements vibration", *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, Vol. 13, no. 1, 2014, pp. 194-199. [In Russian]
- [28] E. V. Shakhmatov, O. A. Zhuravlev, R.N. Sergeev, A. I. Safin, "Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb", *Procedia Engineering*, vol. 106., 2015., pp. 247 - 252.
- [29] D. S. Lezhin, S. V. Falaleev, A. I. Safin, A. M. Ulanov, D.Vergnano, "Comparison of different methods of non-contact vibration measurement", *Procedia Engineering*, vol.176, 2017, pp.175-183.
- [30] K. D. Moeller, *Optics*, New York:Springer-Verlag, 2007.
- [31] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, 2nd ed., New-York –Toronto–London: McGraw-Hill Book Company Inc, 1959.
- [32] B. Osgood, *Lectures on the Fourier Transform and Its Applications*, Providence Rhode Island: American Mathematical Society, 2019.
- [33] IEC 60068-2-81:2003 Environmental testing —Part 2-81: Tests — Test Ei: Shock — Shock response spectrum synthesis (MOD).
- [34] S. Boccaletti, A. N. Pisarchik, C. I. del Genio, A/ Amann, *Synchronization From Coupled Systems to Complex Networks*, New-York: Cambridge University Press, 2018.

THE IMPROVEMENT OF GTE-WHEEL OSCILLATION RECORDING PROCESS BY THE PANORAMIC-TYPE, NOISE-PROOF, DIGITAL SPECKLE-INTERFEROMETER

**A.V. Ivchenko,
A.I. Safin**

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russian Federation

artursafin1988@gmail.com

The paper describes a mobile laser system based on a noise-proof digital speckle pattern interferometer for studying the coupled vibrations of the bladed wheels during engine development stage. The mechanical properties influence of the optical scheme elements of the speckle interferometer when recording information without vibration isolation is studied. It is noted an improvement in the quality of the obtained speckle interferograms with an increase in the construction rigidity of the diffusely scattering element of the speckle pattern interferometer.

Keywords: *bladed wheel; vibration modal analysis; vibrational mode; speckle interferometer; diffusely scattering element; interferogram, visibility*

References

- [1] E. Zio, M. Fan, Z.Zeng, R. Kang, “Application of reliability technologies in civil aviation: Lessons learnt and perspectives”, Chinese Journal of Aeronautics, vol. 32, i.1: 2019., pp.143–158
- [2] A.F. Pashchenko* V.I. Akhrameev, “On Some Approaches to Development of Flight Safety Control System for Experimental and Civil Aviation”, IFAC PapersOnLine, i.54-13, 2021, pp.704–709.
- [3] C-W. Lee, Vibration Analysis of Rotors, Heidelberg: Springer Netherlands, 1993.
- [4] M. L. Adams, Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting, 2nd ed., Boca Roton – London – New-York: CRC Press, 2010.
- [5] M. P. Boyce, Gas Turbine Engineering Handbook. 4th ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2012.
- [6] L. Bertini, P.Neri, C.Santus, A.Guglielmo, G.Mariotti, “Analytical investigation of the SAFE diagram for bladed wheels, numerical and experimental validation”, Journal of Sound and Vibration, vol.333,2014, pp.4771–4788.
- [7] A.V. Kochergin, N.V. Pavlova, K.A. Valeeva, “Vibroacoustic Control of Technical Conditions of GTE”, Procedia Engineering, vol.150, 2016, pp.363-369.
- [8] P. Neri, “Bladed wheels damage detection through Non-Harmonic Fourier Analysis improved algorithm”, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 88, 2017, pp.1–8.
- [9] V.P. Ivanov, Oscillations of turbomachines impellers Moscow: “Mashinostroyeniye” Publish House, 1983. [In Russian]
- [10] S.D. Elenevsky, R.S. Bekbulanov, I.G. Sipukhin, A.M. Buronkin, Yu. N. Shaposhnikov, “Vibration tests for the cooling turbine blades”, in the collected papers: "Scientific basis and methods for increasing the reliability and durability of gas turbine engines", Kiev: “Naukova dumka” Publish House, 1979. pp.149-155. [In Russian]
- [11] Industrial Vibration Modelling, J. Caldwell, R. Bradley, (Eds.) Heidelberg: Springer Netherlands, 1987.
- [12] Gh. Buzdugan, E. Mihăilescu, M. Rades, Vibration measurement, Heidelberg: Springer Netherlands, 1986.
- [13] F.Ya. Balitsky, A.V. Barkov, N.A. Barkova, “Vibration monitoring” in Nondestructive testing: Handbook, Vol.7, Book 2, V.V. Klyuev, (Ed.), Moscow: “Mashinostroyeniye” Publish House, 2006. [In Russian]
- [14] C. Gray, Optical Methods of Engineering Analysis, Cambridge – New-York – Melbourn:Cambridge University Press, 1998.
- [15] Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, N. William and Jr. Sharpe (Eds.), New-York: Springer, 2008.
- [16] Rotating Machinery, optical methods & scanning LDV methods, Vol. 6 in Proceedings of the 37th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics, C. Niezrecki, J. Baqersad, D. Di Maio (Eds.), Springer, 2019.
- [17] M.M.Franson, Speckle optics, Moscow: Mir, 1980.
- [18] R Jones, C. Wykes, Holographic and speckle interferometry. A discussion of the theory,practice and application of the techniques, Cambridge – New-York – Melbourn:Cambridge University Press 1983.
- [19] Interferometry in speckle light: theory and applications, P. Jacquot, J.-M. Fournier (Eds.), Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [20] D.I.Farrant, J.N.Petzing, J.R.Tyrer, “Geometrically qualified ESPI vibration analysis of an engine”, Optics and Lasers in Engineering, vol. 41, i. 4, 2004, pp. 659-671.
- [21] X. Huang, W. Guo, R. Yu, X. Wang, “Real-time high sensibility vibration detection based on phase correlation of line speckle patterns”, Optics & Laser Technology, vol. 148,, 2022, pp. 1-6.
- [22] N. D. Bystrov, A. I. Zhuzhukin, “Speckle-interferometry in the Investigation of Large-size Gas Turbine Engine Structures Vibration”, Procedia Engineering, vol. 176, 2017., pp. 471-475.
- [23] A.V.Ivchenko, A. I. Zhuzhukin, “The system development for digital recording of speckle-interferograms of an oscillating object without vibration isolation”, 2020, International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM 2020),pp 1-8.
- [24] O.A. Zhuravliov, Yu. N. Shaposhnikov, Yu. D. Shcheglov, S.Yu. Komarov Application of holographic and speckle interferometry methods for investigation of vibration and noise, Samara State Aerospace University Press, Samara: 2005. [in Russian]
- [25] Patent Application Publication RU No. 71429 International Class G 01 H 9/00 Device for investigation of Vibration Modes. inventor: A.I. Zhuzhukin. Filed- 14.09.2007.

- [26] O.A. Zhuravliov, A.V. Ivchenko, A.I. Zhuzhukin, S.Yu. Komarov, Yu. N. Shaposhnikov, Yu. D. Shcheglov, “The Noiseproof Digital Speckle Pattern Interferometer for Vibration Modes Study to Industrial Demands”, in Proceeding of International Conference on Application for Image based Measurements, Ulm: Dantec Dynamics GMB, 2012, 10pp.
- [27] An. I. Zhuzhukin and V. A. Solyannikov, “Method of reducing speckle-interferometer sensitivity for the study of turbomachine elements vibration”, Vestnik of the Samara State Aerospace University, Vol. 13, no. 1, 2014, pp. 194-199. [In Russian]
- [28] E. V. Shakhmatov, O. A. Zhuravlev, R.N. Sergeev, A. I. Safin, “Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb”, Procedia Engineering, vol. 106., 2015., pp. 247 - 252.
- [29] D. S. Lezhin, S. V. Falaleev, A. I. Safin, A. M. Ulanov, D.Vergnano, “Comparison of different methods of non-contact vibration measurement”, Procedia Engineering, vol.176, 2017, pp.175-183.
- [30] K. D. Moeller, Optics, New York:Springer-Verlag, 2007.
- [31] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Kriger, Theory of plates and shells, 2nd ed., New-York –Toronto–London: McGraw-Hill Book Company Inc, 1959.
- [32] B. Osgood, Lectures on the Fourier Transform and Its Applications, Providence Rhode Island: American Mathematical Society, 2019.
- [33] IEC 60068-2-81:2003 Environmental testing —Part 2-81: Tests — Test Ei: Shock — Shock response spectrum synthesis (MOD).
- [34] S. Boccaletti, A. N. Pisarchik, C. I. del Genio, A/ Amann, Synchronization From Coupled Systems to Complex Networks, New-York: Cambridge University Press, 2018.