

УДК 621.438

М.Р. ТКАЧ¹, Д.В. ДОВГАНЬ¹, Ю.Г. ЗОЛОТОЙ¹, И.Ю. ЖУК²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*² *Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, Украина*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрено экспериментальное определение динамических характеристик конструктивных элементов ГТД малой мощности методом электронной спекл-интерферометрии (ESPI). Определение спектра собственных частот и форм колебаний конструкции проводилось в реальном времени с панорамной визуализацией колебательных форм. Показана реализация разработанной методики и программно-аппаратного комплекса для вибродиагностики рабочих колёс турбокомпрессоров, обоснована целесообразность применения различных оптических схем интерферометра в зависимости от размера колеса. Приведены интерферограммы форм колебаний рабочих колёс турбокомпрессора.

Ключевые слова: лопатка ГТД, спекл-интерферометрия, собственные частоты и формы колебаний.

Введение

В процессе доводки ГТД особое внимание уделяется определению собственных частот и форм колебаний его рабочих элементов. Анализ эксплуатационной надёжности машин показывает, что во многом их ресурс определяется состоянием лопаток турбин и их рабочих колёс, так как они эксплуатируются в жёстких условиях, вызванных неравномерностью газового потока и высокими температурами. Эффективным инструментом исследования динамических параметров элементов конструкций являются бесконтактные когерентно-оптические методы измерения: голографическая интерферометрия (ГИ) и спекл-интерферометрия [1]. ГИ характеризуется высокими материальными и временными затратами вызванными повышенными требованиями к когерентности лазерного излучения и виброизоляции оптической схемы при проведении эксперимента, а также требует высокоразрешающих фоторегистрирующих материалов с последующей химической обработкой. Метод ESPI обеспечивает вибродиагностику рабочего колеса в режиме экспресс-анализа, т.е. в реальном времени. При этом, временные, трудовые и материальные затраты принципиально ниже таковых для аналоговой голографии.

Экспериментальная часть

Объектом исследования были выбраны рабочие колеса турбокомпрессоров размерности ТКР-5 и ТКР-11, частота вращения которых достигает сотен тыс. мин⁻¹. Колесо компрессора конструктивно рас-

положено консольно и фиксируется на валу гайкой (рис. 1). Биение поверхности вала не должно превышать нескольких мкм, а дисбаланс всего ротора – 0,01...0,02 г·см. Превышение этих величин приводит к ускоренному износу и разрушению подшипников, а также к возникновению виброрезонансных явлений в рабочем колесе турбокомпрессора.

На стенде колесо закреплено консольно на рабочем валу, обеспечивая граничные условия, приближённые к реальным (рис. 1).

На этом же валу собран вибровозбудитель из набора пьезокермических шайб. Особенность резонансных колебаний облопаченных дисков состоит в том, что они представляют собой единую колебательную систему, т.е. колебания лопаток и диска взаимосвязаны [2], причём на некоторых формах эта взаимосвязь просматривается существенно, а на некоторых колебания лопаток и диска можно рассматривать как независимые. Это требует возможность наблюдения форм колебаний, как со стороны диска, так и со стороны облопаченной части.

В работе [3] панорамный обзор вибрирующей детали обеспечивается применением 2-х вспомогательных зеркал. Авторы для регистрации спекл-интерферограмм в реальном времени реализовали панорамный обзор колебательной формы в процессе её наблюдения простым поворотом диска.

Для этого колесо в зажимном устройстве устанавливалось на поворотной платформе, ось вращения которой совмещена с вертикальным диаметром колеса.

При исследовании компрессорного колеса ТКР-5 оптическая схема установки реализует метод ESPI с диффузным опорным пучком [4].

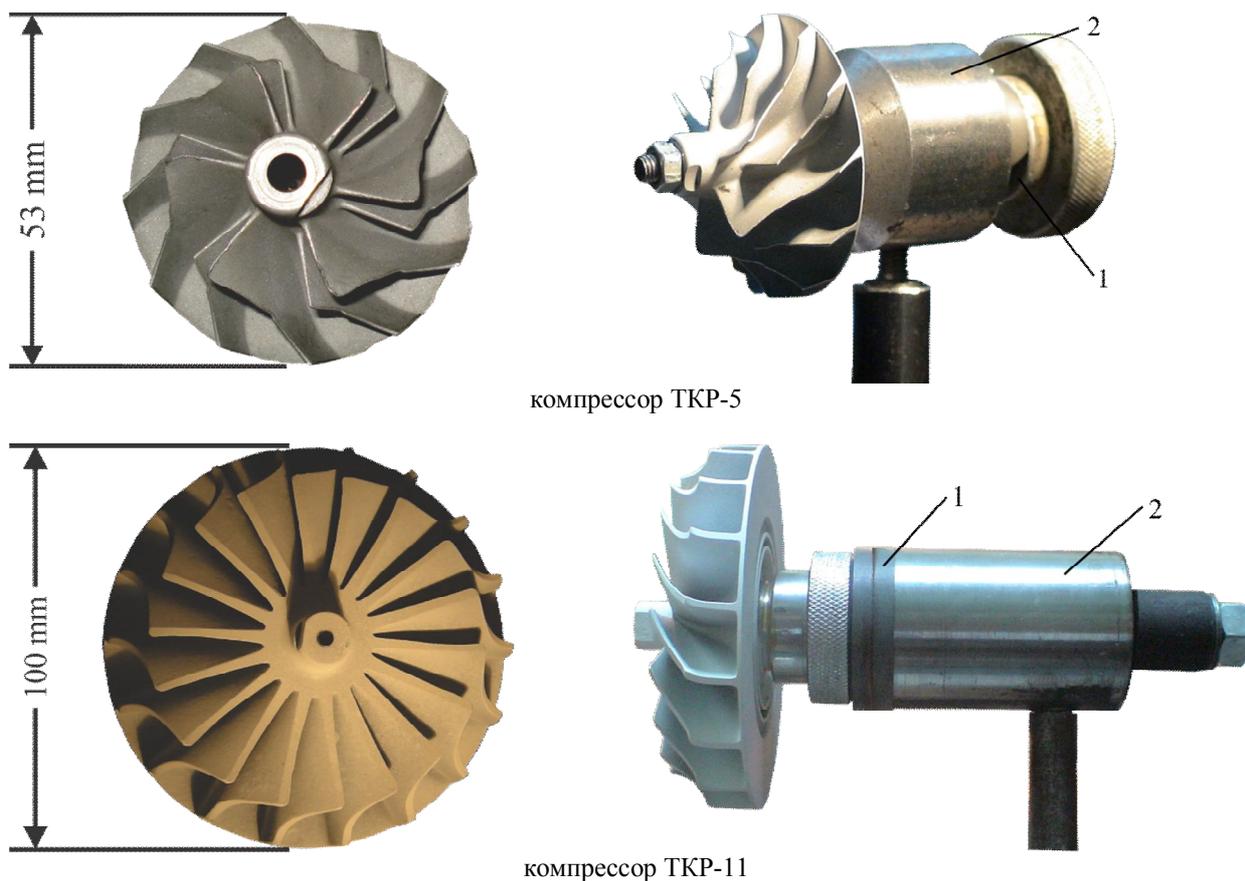


Рис. 1. Рабочее колесо турбокомпрессора в зажимном устройстве:
1 – пьезовибропреобразователь, 2 – инерционный упор

В качестве источника света служит лазер ЛГН-215 мощностью излучения 50 мВт, $\lambda=0,568$ мкм и длиной когерентности порядка 20 см. Луч лазера 1 расширяется сферическим зеркалом 2 и через светоделитель 4 освещает вибрирующий объект 5, образуя на матрице видеокамеры 3 предметное спекл-поле. Отражённый от светоделителя 4 свет диффузно рассеивается ретроотражателем 6, который вибрирует с частотой 2-3 Гц в направлении освещения, образуя опорное спекл-поле. В качестве ретроотражателя использована полимерная световозвращающая плёнка. Падающий на неё свет отражается преимущественно в направлении источника освещения, и варьируя в небольших пределах расстоянием между зеркалом 2 и оптической осью камеры, появляется возможность оптимизировать интенсивность опорного пучка. Кроме того, высокий коэффициент отражения световозвращающей плёнки позволяет рационально использовать энергию лазерного луча, а в качестве светоделителя применять стеклянную пластинку толщиной 2-3 мм. Светоделитель расположен как можно ближе к объекту с целью минимизации влияния на интерферометр внешних возмущений.

Интерференция предметного и опорного спекл-полей происходит на светочувствительной матрице

видеокамеры. Перед камерой дополнительно установлена диафрагма таким образом, чтобы средний размер спеклов занимал несколько пикселей на изображении. В работе использовалась DV камера SONY DCR-TRV с разрешением 720x576.

Вибровозбуждение исследуемой конструкции осуществляется пьезокерамическим вибропреобразователем, на который подаётся синусоидальный сигнал звукового генератора, усиленный усилителем низкой частоты 9.

В работе [5] нами предложена и реализована методика определения динамических параметров лопаток ГТД путём определения функции контраста спекл-картины. Но используемый при этом алгоритм компьютерной обработки видеопотока требует высоких вычислительных ресурсов при работе на больших разрешениях изображения, т.к. необходимо непрерывно анализировать яркость каждой точки мерцающего спекл-поля. При этом чем больше буфер, тем качественнее картина, но ниже отзывчивость работы ПО.

В данной работе применялся стандартный подход корреляционной спекл-интерферометрии – фиксация первого изображения, сдвиг фазы, повторная фиксация и последующее сравнение этих

изображений. Основная идея определения колебательных мод в реальном времени заключается в том, что бы обрабатывать кадры, записанные в моменты соседних амплитудных отклонений ретроотражателя, колеблющегося с частотой 2-3 Гц и амплитудой $0,25\lambda$. Проблема согласования колебаний и фиксации кадров была решена следующим образом. Сигнал возбуждения низкочастотных

колебаний через компаратор заводится в ПК и ПО регистрирует кадры через определённый промежуток времени после изменения полярности возбуждающего сигнала. Каждый последующий кадр вычитается из предыдущего и поднимается контраст полученной картины. В результате мы наблюдаем изменяющуюся картину интерференции на мониторе ПК (рис. 3).

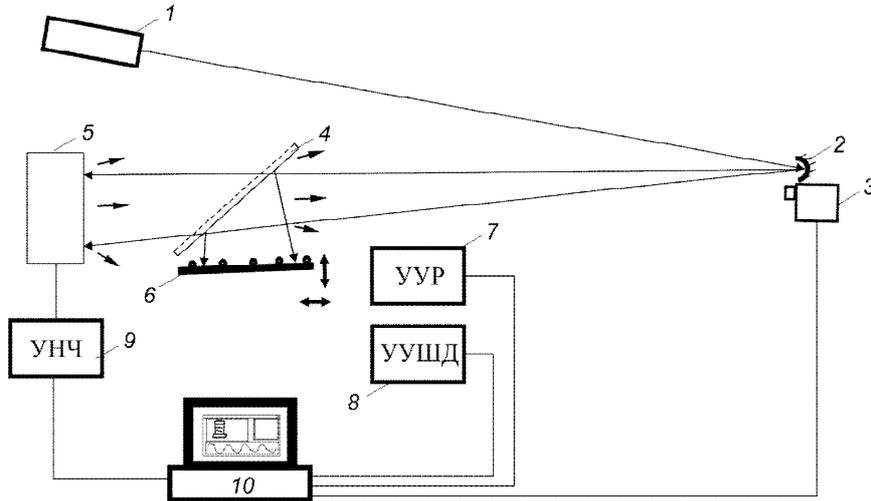


Рис. 2. Помехозащищённая оптическая схема установки с ретроотражателем:

1 – лазер, 2 – зеркало, 3 – камера, 4 – стекло, 5 – объект исследования,
6 – подвижный ретроотражатель, 7 – устройство управления ретроотражателем(УУР),
8 – устройство управления шаговым двигателем(УУШД), 9 – усилитель низкой частоты (УНЧ), 10 – ПК

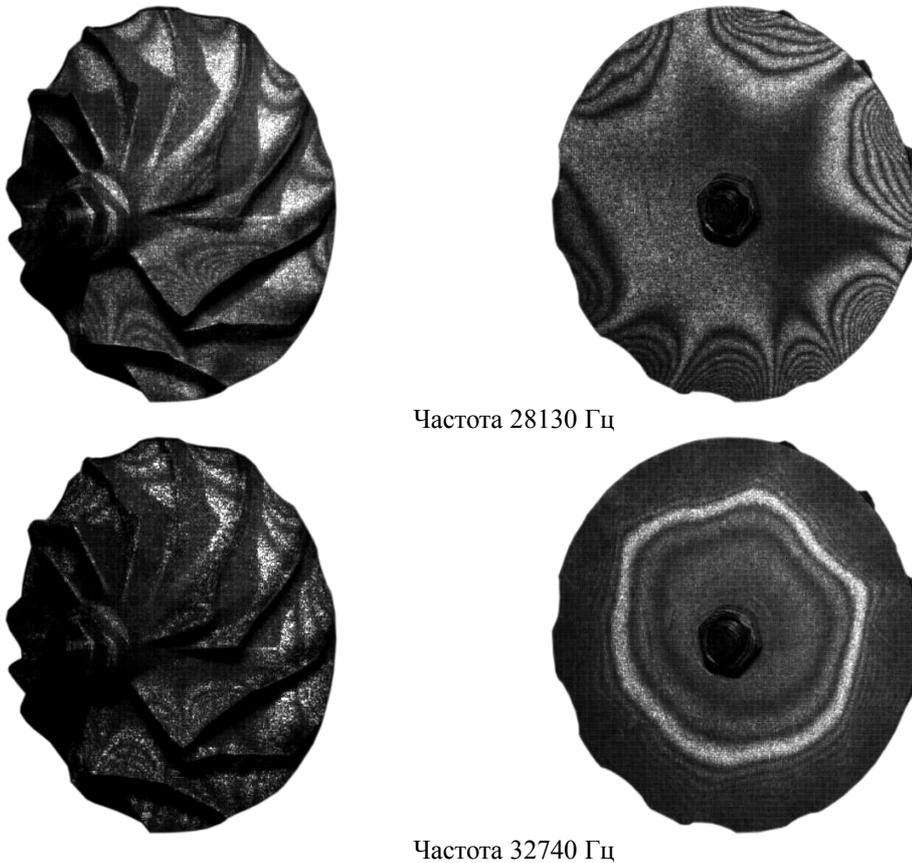


Рис. 3. Формы колебаний колеса ТКР-5

В рассмотренной оптической схеме (рис. 2) размер ретроотражателя должен быть больше объекта. Это вызывает неудобства при исследовании крупных объектов, вследствие необходимости вибрировать большой пластиной. При исследовании колеса ТКР-11 оптическая схема подверглась доработке, позволяющей исследовать объекты любых размеров, которые возможно разместить на стенде. При этом оптическая схема интерферометра усложняется незначительно. Луч лазера 1 через микрообъектив 2 и светоделительный клин 3 освещает вибрирующий объект 4, создавая предметное спекл-поле. Отражённый луч коимируется линзой 5 и попадает на подвижное зеркало 6, которое перемещается в нормальном направлении с частотой 2-3 Гц. Далее свет, проходя через рассеиватель 9, образует опорное спекл-поле. Совмещение опорной и предметной картины происходит непосредственно вблизи объектива камеры 11 на стекле 10. Амплитуда колебаний зеркала 6 выбирается такой, чтобы при минимальном её значении результирующие картины спеклов, соответствующие моментам амплитудных отклонений были взаимно инвертированы. Камера передаёт полученное изображение на ПК 12, где происходит дальнейшая обработка.

Повысить качество результирующей интерференционной программы удалось усреднением нескольких изображений полученных при различных опорных спекл

полях. Это достигалось смещением на 100-200 мкм ретроотражателя (рис. 2) или рассеивателя (рис. 4) в его плоскости между экспозициями с помощью привода с шаговым двигателем, которым управляет УУШД 8 с ПК 12.

Ряд характерных форм колебаний колеса компрессора ТКР-11 приведен на рис. 5.

Компьютерная обработка данных аналогична предыдущему варианту.

Внешний вид окна программы обработки приведён на рис. 6. Для увеличения контраста контуров объекта сложной геометрической формы изображение, полученное после описанных вычислений, модулировалось изображением объекта в белом свете.

Выявленные частоты и формы колебаний даны в табл. 1. Как следует из приведенных данных экспериментально выявлены резонансные колебания при которых амплитуды колебаний лопаток на порядок превышают амплитуды колебаний точек диска – колебания единичных лопаток (КЕЛ). На ряде частот колебания рабочего колеса эквивалентны формам колебаний диска с приведенной жёсткостью (ДПЖ). На большей части резонансных частот получены связанные колебания. В этом случае в процесс вибрации вовлечены диск и лопатки одновременно и амплитуды колебаний лопаток соизмеримы с амплитудами колебаний точек диска.

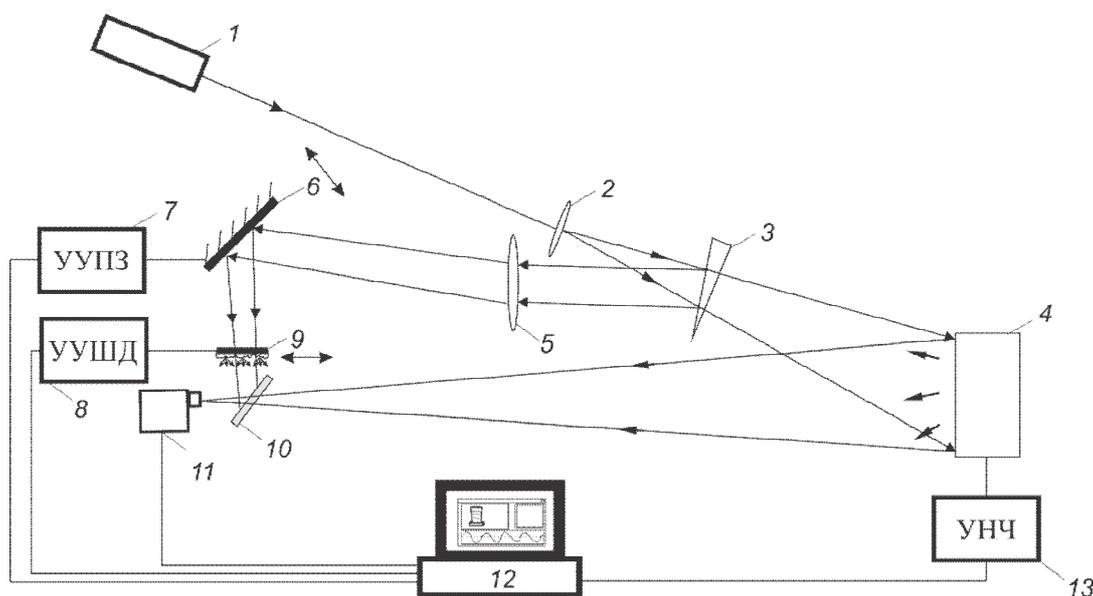


Рис. 4. Оптическая схема установки для исследования крупногабаритных объектов:
 1 – лазер, 2 – микрообъектив, 3 – светоделительный клин, 4 – объект исследования, 5 – линза,
 6 – подвижное зеркало, 7 – устройство управления подвижным зеркалом (УУПЗ),
 8 – устройство управления шаговым двигателем (УУШД), 9 – рассеиватель,
 10 – стекло, 11 – камера, 12 – ПК, 13 – усилитель низкой частоты (УНЧ)

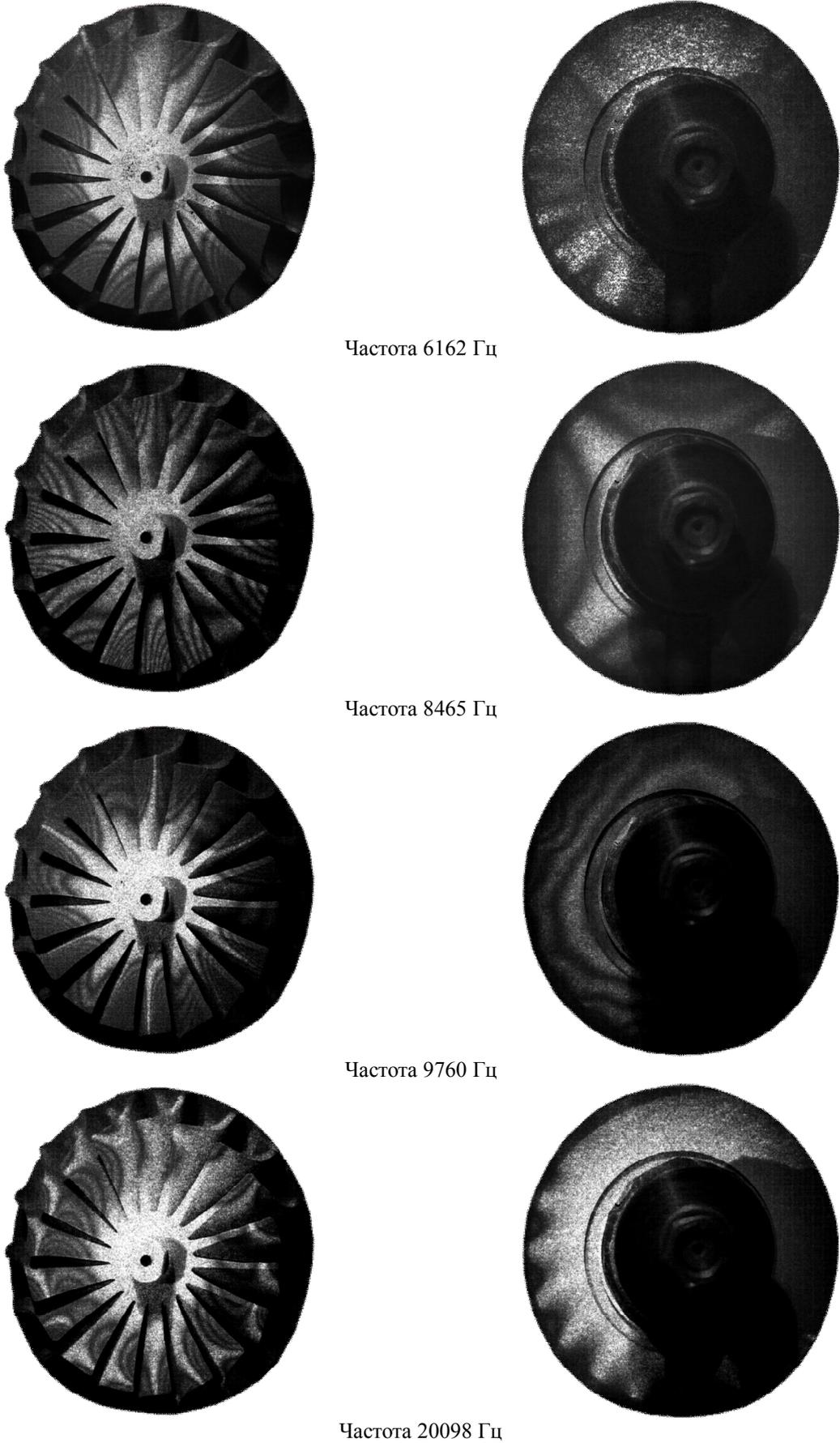


Рис. 5. Формы колебаний колеса ТКР-11

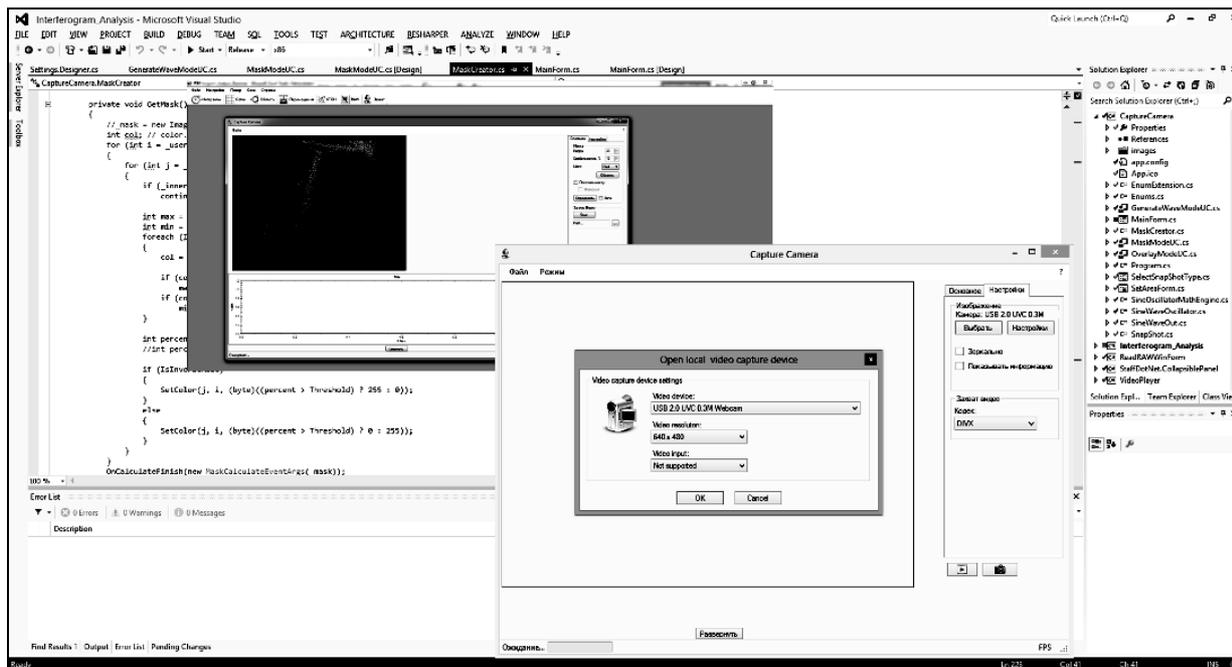


Рис. 6. Интерфейс программы обработки

Таблица 1

Характерные частоты и формы колебаний рабочих колес турбокомпрессоров

ТКР 11		ТКР 5	
Частота, Гц	Форма колебаний	Частота, Гц	Форма колебаний
5547	связанные	17835	ДПЖ**
5650	связанные	20320	ДПЖ
6591	КЕЛ*	22180	ДПЖ
7739	КЕЛ	22630	ДПЖ
8463	связанные	28130	связанные
9713	КЕЛ	32740	ДПЖ
10680	КЕЛ	36100	КЕЛ
11022	связанные	51250	ДПЖ
11859	связанные	67140	связанные
12795	связанные		
14880	связанные		
15067	ДПЖ		
20028	КЕЛ		
31000	КЕЛ		

* – колебания единичных лопаток,

** – колебаний диска с приведенной жёсткостью

Выводы

1. На основе разработанного и реализованного программно-аппаратного комплекса для исследования собственных колебаний элементов ГТД методом электронной спекл-интерферометрии (ЕСПИ) в реальном времени с возможностью панорамного обзора колебательных форм. Выявлено 22 формы собственных колебаний у рабочего колеса ТКР-11 и 13 форм у ТКР-5.

2. Показано наличие трёх групп форм колебаний рабочего колеса турбокомпрессора: колебания единичных лопаток; колебания диска; связанные колебания диска и лопаток.

3. Применение оптической схемы с ретроотражателем целесообразно для исследования малогабаритных объектов, что даёт преимущество помехозащищённости схемы за счёт создания картины интерференции в непосредственной близости к объекту исследования.

4. Для исследования объектов больших геометрических размеров рационально использовать усложнённую оптическую схему с диффузным рассеивателем, что упрощает реализацию смещения опорного пучка, но снижает помехозащищённость схемы.

Литература

1. Jones, R., *Holographic and Speckle Interferometry. 2 edition [Text] / R. Jones, C. Wykes // Cambridge University Press, ISBN: 0521348781, 1989. – 386 p.*
2. Макаева, Р.Х. *Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии. [Текст]: моногр./ Р.Х. Макаева. – Казань: Изд-во гос. техн. ун-та, 2011. – 242 с.*
3. Жужукин, А.И. *Спекл-интерферометр для панорамного исследования колебаний турбинных лопаток [Текст] / А.И. Жужукин, В.А. Соляников // Научный журн. «Известия Самарского научного центра РАН». – 2012. – № 6. – С. 59 – 62.*
4. Жужукин, А.И. *Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестеновых условиях*

[Текст] / А.И. Жужукин // Электронный журн. Тр. МАИ». - 2011. - № 48. - 9 с.

5. Определение форм собственных колебаний элементов ГТД в реальном времени методом элек-

тронной спекл-интерферометрии [Текст] / М.Р. Ткач, Ю.Г. Золотой, Д.В. Довгань, И.Ю. Жук //

Авиационно-космическая техника и технология. - 2012. - № 8 (95). - С. 203 - 207.

Поступила в редакцию 29.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ І ФОРМ КОЛИВАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБІН МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

М.Р. Ткач, Ю.Г. Золотий, Д.В. Довгань, І.Ю. Жук

Розглянуто експериментальне визначення динамічних характеристик конструкційних елементів ГТД малої потужності методом електронної спекл-інтерферометрії (ESPI). Визначення спектра власних частот і форм коливань конструкції проводилося в реальному часі з панорамною візуалізацією коливальних форм. Показано застосування розробленої методики та програмно-апаратного комплексу для вібродіагностики робочих коліс турбокомпресорів, доведено доцільність використання різних оптичних схем інтерферометра залежно від розміру колеса. Наведено інтерферограми форм коливань робочих коліс турбокомпресора.

Ключові слова: лопатка ГТД, спекл-інтерферометрія, власні частоти та форми коливань.

AUTOMATION OF OSCILLATION FORMS DETERMINATION OF LOW POWER GTE ELEMENTS

M.R. Tkach, Yu.G. Zoloty, D.V. Dovgan, I.Yu. Guk

The experimental determination of the dynamic parameters of GTE elements using method of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) was shown. The application of the developed method and the hardware and software complex to determine the spectrum of oscillations and mode shapes in panoramic view in in real-time was exhibited. Using of various optical interferometer schemes depending on the size of the compressor wheel was proved. Interferograms of oscillation forms of turbocharger compressor wheel were shown.

Keywords: GTE blade, speckle interferometry, the self-resonant frequencies and mode shapes.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. теоретической механики Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com.

Золотой Юрий Григорьевич – зав. лаб. лазерных средств измерений Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: yurii.zoloty@nuos.edu.ua.

Довгань Дмитрий Витальевич – аспирант Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dmytro.dovgan@nuos.edu.ua.

Жук Ирина Юрьевна – ст. преподаватель Черноморского государственного университета имени Петра Могилы, Николаев, Украина, e-mail: goldspekl@ukr.net.