

УДК 620.179.18

ВСТАНОВЛЕННЯ І ЗАКРІПЛЕННЯ ЛОПАТОК ГТД ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ВИЗНАЧЕННІ ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Ключник В.С.¹; Ткач М.Р.²; Золотий Ю.Г.³; Галинкін Ю.М.⁴; Проскурін А.Ю.⁵

¹аспірант кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв
vladimir.kluchnyk@gmail.com

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв
tyukhaylo.tkach@nuos.edu.ua

³завідувач лабораторією кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв
goldspekl@ukr.net

⁴кандидат технічних наук, викладач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв
yurii.galynkin@nuos.edu.ua

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установки та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв
arkadii.proskurin@nuos.edu.ua

Анотація. Представлені схеми закріплення лопатки ГТД при експериментальному визначенні їх вібраційних характеристик. Описано переваги і недоліки схем закріплення. Розроблено спеціальне оснащення, що дозволяє визначати вібраційні характеристики лопатки в процесі її експлуатації.

Ключові слова: лопатка ГТД; цифрова спекл-інтерферометрія; вільні коливання; вільні граничні умови.

Вступна частина. Визначення модального спектра лопаток дозволяє на стадіях проектування і доведення газових турбін виявити діапазони резонансних частот обертання, а також провести діагностику [1]. Їх зміна може служити надійною діагностичною ознакою появи або розвитку дефектів конструкції [2, 3]. Тому при виготовленні або ремонті лопаток турбін доволі часто потрібен серійний контроль резонансного спектру в умовах виробничої лабораторії [4, 5]. Однак, складна геометрична форма досліджуваного об'єкта, ускладнює експериментальне відтворення граничних умов кріплення лопатки, що знаходиться в процесі експлуатації. Тому метою даної роботи є розробка методів кріплення робочої лопатки ГТД, при експериментальному визначенні їх вібраційних характеристик методом цифрової спекл-інтерферометрії (ЦІ).

Основна частина. У даній роботі об'єкт випробувань розміщується на жорсткому столі, по можливості захищеному від механічних впливів, температурних перепадів і конвективних потоків. Досвід використання ЦІ показав, що при отриманні інтерферограми методом визначення контрасту спеклів, стійкість інтерферометра вище, ніж при використанні методів спекл-кореляції [6, 7].

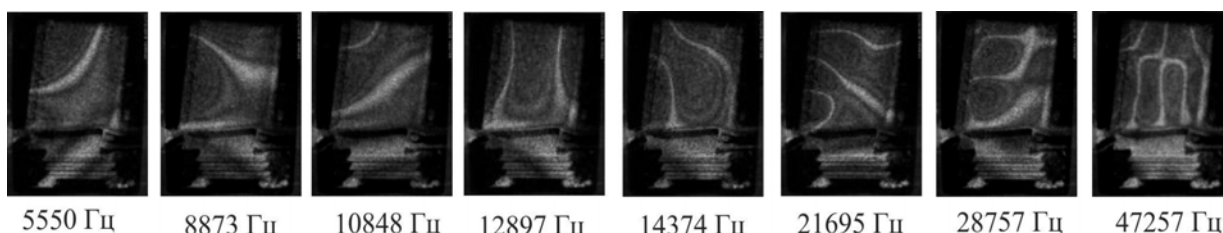
На стенді конструкція монтується з дотриманням умов її кріплення в процесі експлуатації, або моделюванням граничних умов згідно з вимогами експерименту. Наприклад, спектр власних частот і форм коливань лопаток газотурбінного двигуна (ГТД) визначається при жорсткому закріпленні їх замкової частини за допомогою спеціального затискного пристрою (рис. 1) [8, 9].



поверхня закріплення

Рисунок 1 - схема закріплення замкової частини робочої лопатки

Основна перевага цифрового спекл-інтерферометра в тому, що він не вимагає жорсткого кріплення об'єкта в оптичній схемі, якщо цього не передбачає його конструкція або умови випробувань. Наприклад, на рис.2. представлені кілька інтерферограм резонансних коливань лопатки ГТД при фактично вільних граничних умовах (лопатка встановлена на м'яких силіконових стійках, рис. 3).

**Рисунок 2 – інтерферограми резонансних коливань лопатки при вільних граничних умовах**

силіконові стійки

Рисунок 3 – розміщення лопатки при фактично вільних граничних умовах

Такі дослідження можуть виявитися корисними при проведенні вібродефектоскопії [10], коли для неруйнівного контролю використовують вібронавантажені деталі. Наявність дефекту або зміну властивостей матеріалу виявляють шляхом порівняння власної частоти і форми коливань об'єкта з резонансними параметрами бездефектного зразка. Але для цього необхідно

виключити вплив не ідентичних граничних умов деталей при реєстрації порівнюваних інтерферограм. При вільних граничних умовах ця вимога виконується автоматично.

Так як представлені методи затиснення не дозволяють визначити вібраційні характеристики лопатки, безпосередньо в процесі її експлуатації, розроблене спеціальне оснащення. Дане оснащення дозволяє визначати вібраційні характеристики лопатки закріпленої в корпусі затискного пристрою з додатковою закруткою бандажної полиці, що повторює умови її затиснення в лопатковому вінці. Приклад закріплення лопатки з закруткою бандажної полиці представлений на рис. 4.



Рисунок 4 – закріплення лопатки з закруткою бандажної полиці

Висновки. Показано метод закріплення замкової частини лопатки ГТД для визначення вібраційних характеристик, методом цифрової спекл-інтерферометрії. Представлений метод розміщення лопатки на м'яких силіконових стійках, для забезпечення вільних граничних умов. Розроблено спеціальне оснащення, що дозволяє експериментально визначати вібраційні характеристики лопатки в процесі її експлуатації, шляхом закрутки бандажної полиці.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И.А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.
- [2] Гецов, Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин [Текст] / Л. Б. Гецов. – Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2010. – Кн. 1. – 611 с.
- [3] Бердник, О. Б. Живучесть материала лопаток турбин при длительных сроках эксплуатации [Текст] / О. Б. Бердник, И. Н. Царева, М. К. Чегуров // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1(97). – С. 28-35. DOI: <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-97-1-28-35>.
- [4] Неразрушающий контроль: справочник под ред. В. В. Клюева. Том 7. Методы акустической эмиссии. Кн.1. Вибродиагностика. Кн.2. – М.: Машиностроение. – 2005, 829 с.
- [5] Филатов, М. А. Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / М. А. Филатов, В. С. Судаков // МиТОМ. – 1995. – № 6. – С. 12–15.
- [6] Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical Vibrodiagnostic Complex [Text] / Tkach M. [et al.] // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021. – vol 188, pp. 277-289. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_23.
- [7] Комаров, Ю. С. Помехоустойчивый цифровой спекл – интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени [Текст] : дис. ... канд. тех. наук / Ю. С. Комаров. - Самара, 2004. – 234 с.

[8] Левин А.В. Рабочие лопатки и диски паровых турбин [Текст] / А.В. Левин. – Москва: Госэнергоиздат, 1953. – 624 с.

[9] Бабаков И.М. Теория колебаний [Текст] / И.М. Бабаков. – Москва: Наука, 1965. – 559 с.

[10] Макаева, Р. Х. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии [Текст]: монография. / Р. Х. Макаева, А. Х. Каримов, А. М. Царева. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – 242 с.

Method of installing and fixing gas turbine blades in the experimental determination of vibration characteristics by digital speckle interferometry.

Kluchnyk V.S.¹, Tkach M.R.², Zlotiy Y.H.³, Proskurin A.Y.⁴, Halynkin Y.M.⁵

¹⁻⁵ Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract. Schemes of fixing of the GTE blade at experimental determination of their vibration characteristics are presented. The advantages and disadvantages of fastening schemes are described. Special equipment has been developed to determine the vibration characteristics of the blade during its operation.

Key words: GTE blade; digital speckle interferometry; free oscillations; free boundary conditions.

УДК 628.165:621.44

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНИЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВІКИДІВ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГАЗОПОВІТРЯНИХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ ВІДПРАЦЬОВАНИХ
ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ УСТАНОВОК**

С.А. Кузнецова¹

*кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна
svitlana.kuznetsova@nuos.edu.ua*

Анотація. Для зниження експлуатаційних витрат суднових енергетичних установок запропоновано використання ежекційних газоповітряних охолоджувачів для зниження рівня шкідливих викидів. Методом математичного моделювання отримано, що можливе зниження концентрації NO_x від 4 до 7,5% в залежності від потужності двигунів.

Ключові слова: енергетична установка, рівень викидів, відпрацьовані гази, газоповітряний охолоджувач

Посилення вимог Міжнародної морської організації (*International Maritime Organization – IMO*), щодо значного зниження рівня шкідливих викидів, викликає необхідність запровадження додаткових заходів, а можливо і модернізації енергетичних установок існуючого транспорту для забезпечення можливості роботи в сучасних умовах [1, 2].

Провідні світові постачальники суднового обладнання пропонують широкий спектр допоміжного обладнання для зниження рівня SO_x та NO_x у відпрацьованих газах суднових енергетичних установках.

Так для очищення газів від SO_x компанія *Alfa Laval* пропонує систему *Pure SO_x*, яка гарантує відповідність рівня викидів вимогам 2020 року [3]. Також аналогічним обладнанням займається і *Wärtsilä*, що виготовляє скрубери, які можуть використовуватися з одним чи декількома підводами газів для зниження масогабаритних показників [4].

Фірма *Wärtsilä* пропонує систему з використанням *NOR* фільтрів, які можуть використовуватися як самостійно, так і з вбудованими глушниками для зниження масогабаритних показників [5, 6].