

УДК 620.17

Ю.Г. ЗОЛОТИЙ¹, І.Ю. ЖУК², О.М. ТРУНОВ², Д.О. ЖУК¹¹Національний університет кораблебудування ім. адм Макарова, Миколаїв, Україна²Миколаївський державний гуманітарний університет ім. Петра Могили, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛОПАТОК ПРИ РЕЗОНАНСНІЙ ВІБРАЦІЇ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Розглядається питання експериментального визначення напружено-деформованого стану (НДС) лопатки ГТД при резонансних коливаннях методом стробоголографічної віброметрії. Запропонована методика автоматизованого визначення порядків інтерференційних смуг в реальному масштабі часу та методика обчислення механічних деформацій дискретно заданої поверхні по даним голографічного експерименту.

голографія, інтерферометрія, лопатка ГТД, механічні деформації, лазер, автоматизація

Постановка проблеми

Збільшення питомої потужності сучасних газотурбінних двигунів (ГТД), використання форсованих режимів роботи при критичних швидкостях обертання роторів визначають проблему віброміцності лопаткового апарату, як одну з основних при конструюванні та доводці турбомашин.

В арсеналі сучасної експериментальної механіки одним з ефективних методів дослідження коливань лопаток газотурбінних двигунів є метод голографічної інтерферометрії [1]. Завдяки можливості візуально в реальному часі спостерігати виникнення резонансних коливань та фіксувати методом Пауелла-Стетсона інтерферограму розподілу амплітуд по поверхні досліджуваного об'єкту, голографічний інтерферометр ефективно використовується для визначення спектру власних частот і форм коливань лопаток [2].

В той же час для коротких лопаток зі значною кривизною поверхні положення нульової смуги на усередненій по часу інтерферограмі не завжди відповідає дислокації вузлових ліній. Дійсно, згідно основного рівняння голографічної інтерферометрії

$$\vec{K}_i \vec{U} = N_i \lambda, \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

де $\vec{U}(x, y, z)$ – вектор переміщення точки досліджуваної поверхні в декартовій системі координат;

\vec{K}_i – вектор чутливості інтерферометра, що відповідає цій точці на i -й інтерферограмі і визначається, як різниця одиничних векторів спостереження \vec{K}_c та освітлення \vec{K}_o ;

N_i – порядки інтерференційних смуг в цій точці на відповідних інтерферограмах;

λ – довжина хвилі випромінювання лазера.

Тобто, "оптичний нуль" на інтерферограмі буде відповідати не тільки вузлам коливань ($U = 0$), а й точкам поверхні лопатки, в яких \vec{U} перпендикулярний \vec{K} . Це означає, що визначення форми коливань вимагає обчислення по інтерферограмі поля вібропереміщень точок досліджуваної поверхні.

Друга нагальна проблема, яка тісно пов'язана з попередньою, полягає у визначенні НДС поверхні віброуючої лопатки по даним голографічного експерименту. Досвід показує, що обчислення деформацій вище згаданих лопаток тільки по нормальній складовій вібропереміщення (наприклад, з використанням гіпотез тонких оболонок) призводить до значної похибки. Тому знову виникає необхідність роз-

шифровки голографічних інтерферограм по всім трьом компонентам амплітуди з послідуочим обчисленням деформацій згідно співвідношень Коші.

Цій проблемі присвячена велика кількість робіт [3]. Найбільш прийнятним для отримання кількісної інформації є трьохголограмний двохекспозиційний метод, що базується на використанні системи рівнянь (1).

В загальному випадку реалізація такого підходу до розшифровки інтерферограм є достатньо складною, бо вимагає одночасної реєстрації як мінімум трьох інтерферограм. Окрім того, при дослідженні резонансних коливань для забезпечення високого контрасту смуг (і зменшення похибки визначення \vec{U}) виникає необхідність стробоскопічного освітлення для запису інтерферограм [4]. Оптична схема голографічного стенду стає надзвичайно громіздкою, а експеримент дуже трудомістким.

Мета роботи – розробка оптимальної оптичної схеми голографічного стенду, методики експериментального дослідження резонансних коливань лопатки ГТД та визначення деформованого стану її віброуючої поверхні по даним голографічного експерименту.

Методика розшифровки голографічних інтерферограф

Методика розшифровки голографічних інтерферограм по визначенню вібропереміщень точок поверхні віброуючої лопатки створювалась в припущенні, що інтерферограми реєструються при стробованому освітленні і можуть розглядатись як двохекспозиційні.

Окрім того, розміри лопаток не завжди допускають колімоване освітлення та телескопічну систему спостереження інтерферограм. Т

обто, освітлення лопаток здійснюється розбіжним світловим пучком, а спостереження інтерферограм є точковими.

Для встановлення відповідності між картиною інтерференції та координатами точок поверхні на лопатку нанесена розміткова сітка по перерізам теоретичного креслення у випадку дискретного її задання.

Так як напрямок вектора \vec{U} завчасно невідомий, то система (1) повинна складатись з трьох рівнянь, причому, вектори \vec{K}_i не повинні бути компланарними [1].

Згідно цих умов проблемна оптична схема голографічної установки представлена на рис. 1. В ній досліджувана лопатка жорстко закріплюється в кореневому перерізі за допомогою спеціального затискуючого пристрою 2 з вмонтованим в нього п'єзовібробуджувачем 3.

Джерелом когерентного випромінювання служить HeNe – лазер ЛГН-215 – блок 4. Його промінь проходить через електрооптичний модулятор 5 типу МЛ-3 і дзеркалом 6 направляється на світлоділник 7. З відбитого від нього променя дзеркалами 8 та 9 сформована опорна світлова хвиля 10, що падає на фотопластинку 11, де фіксується голограма. Промінь, який пройшов через світлоділник, за допомогою дзеркала 12 та мікрооб'єктива 13 утворює розбіжний світловий пучок 14, що освітлює лопатку. Мікродіафрагми 15 та 16 служать для фільтрації опорної і освітлюючої хвиль.

Особливістю оптичної схеми є наявність поряд з лопаткою двох взаємно перпендикулярних плоских дзеркал 17 і 18. Дзеркала розміщені так, що цифрова відеокамера 19 через голограму 11 реєструє як безпосередньо поверхню досліджуваної лопатки, так і її зображення в дзеркалах.

Очевидно, що коли таким чином спостерігається інтерферограма, то її пряме зображення відповідатиме позиції спостереження 19, а зображення в дзеркалах 17 і 18 будуть еквівалентні спостереженням картини інтерференції з позицій 19а і 19б, симетричних до 19 відносно площин дзеркал.

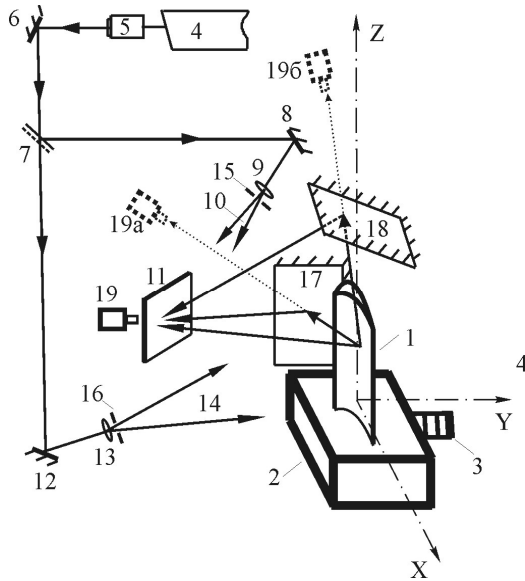


Рис. 1. Оптическая схема голографического интерферометра

Таким чином, маємо три напрямки спостереження лопатки при одному напрямку освітлення, які для кожної реперної точки дають змогу скласти таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \bar{U}(\bar{K}_{c_1} - \bar{K}) = N_1 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{c_2} - \bar{K}) = N_2 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{c_3} - \bar{K}) = N_3 \cdot \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

В декартових координатах глобального базису лопатки ці рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} & U_x \left(\frac{x_{c_1} - x}{r_{c_1}} + \frac{x_0 - x}{r_0} \right) + U_y \left(\frac{y_{c_1} - y}{r_{c_1}} + \frac{y_0 - y}{r_0} \right) + U_z \left(\frac{z_{c_1} - z}{r_{c_1}} + \frac{z_0 - z}{r_0} \right) = N_1 \lambda \\ & U_x \left(\frac{x_{c_2} - x}{r_{c_2}} + \frac{x_0 - x}{r_0} \right) + U_y \left(\frac{y_{c_2} - y}{r_{c_2}} + \frac{y_0 - y}{r_0} \right) + U_z \left(\frac{z_{c_2} - z}{r_{c_2}} + \frac{z_0 - z}{r_0} \right) = N_2 \lambda \\ & U_x \left(\frac{x_{c_3} - x}{r_{c_3}} + \frac{x_0 - x}{r_0} \right) + U_y \left(\frac{y_{c_3} - y}{r_{c_3}} + \frac{y_0 - y}{r_0} \right) + U_z \left(\frac{z_{c_3} - z}{r_{c_3}} + \frac{z_0 - z}{r_0} \right) = N_3 \lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

де U_x, U_y, U_z – проекції вектора вібропереміщення досліджуваної точки на осі координат;

$$r_{c_i} = \sqrt{(x_{c_i} - x)^2 + (y_{c_i} - y)^2 + (z_{c_i} - z)^2} -$$

модуль вектора, що з'єднує i -ту точку спостереження з досліджуваною точкою;

$$r_0 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} -$$

модуль вектора, який з'єднує точку освітлення з досліджуваною точкою.

Коефіцієнти лівої частини рівнянь (3) визначаються геометрією лопатки та оптичної схеми, тобто, вони повинні бути виражені в загальній системі координат. З цією метою спроектований та виготовлений спеціальний координатний пристрій. Його рухома каретка виконує два поступальних ортогональних переміщення, а в якості "щупів" використовуються промені лазерних діодів. Досвід показав зручність та достатньо високу точність таких вимірювань.

Найбільш трудомістким етапом експерименту є виготовлення стробованих інтерферограм та визначення порядків інтерференційних смуг N_i для кожного з вузлів розміткової сітки. З іншого боку, комп'ютерна обробка статичних зображень голографічних інтерферограм в зонах з великою густиною смуг є ненадійною.

Вплив спекл-шуму призводить до неприйнятно великої похибки навіть цілих значень N_i .

Значною мірою уникнути цих складнощів нам вдалося шляхом реєстрації інтерферограм на відеокамеру в реальному часі при повільному рівномірному скануванні фази механічних коливань стробуючим імпульсом високої сквапності (40 – 50). Блок-схема використаного електронного комплексу представлена на рис. 2.

Для вібробудження лопатки сигнал звукового генератора 1 після підсилення по напрузі підсилювачем 2 подається на вібробуджувач 3. Коливання лопатки спостерігаються в реальному масштабі часу через попередньо зареєстровану опорну голограму і відображаються на екрані двопробного осцилографа 5 сигналом індукційного датчика 4.

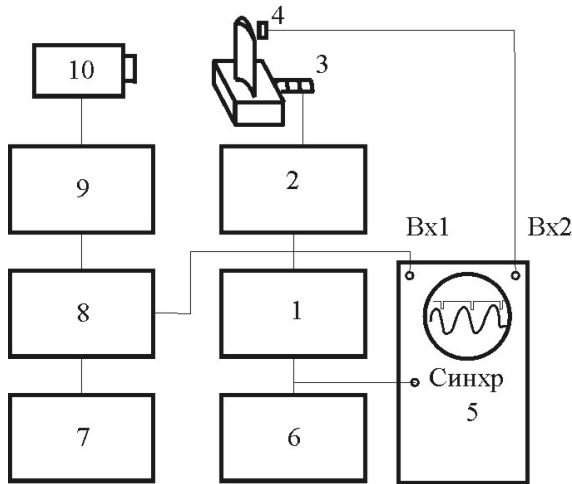


Рис. 2. Блок-схема електронного строболографічного комплексу

Після фіксації резонансу та визначення резонансної частоти частотоміром 6, звуковий генератор 7 налаштовується на цю ж частоту з зсувом в 1-2 Гц. Цим сигналом запускається генератор прямокутних імпульсів 8, які після підсилення до напівхвильової напруги підсилювачем 9 подаються на модулятор випромінювання 10, і контролюються другим каналом осцилографа. Із-за незначної різниці між частотою коливань та частотою стробуючих імпульсів на інтерферограмах спостерігаються повільні коливання у вигляді “живих” смуг, які записуються на кінограмі.

Створена комп'ютерна програма дозволяє попіксельно профотометрувати зображення, при цьому часова розгортка яскравості кожного пікселя має вигляд, характерний для сигналу одночастотного лазерного вібрметра (рис. 3).

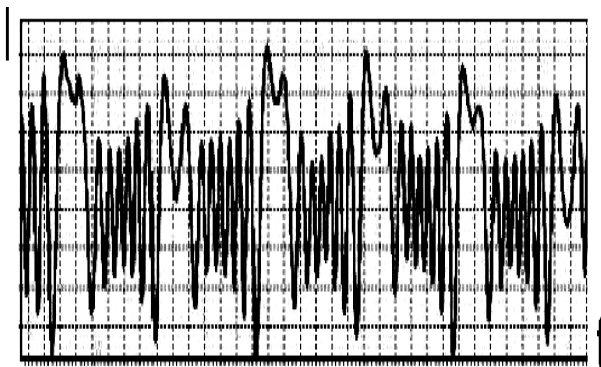


Рис. 3. Часова розгортка зміни яскравості однієї з точок кінограми

Звідси значення N_i обчислюється автоматично з точністю до 0,1 смуги. Важливо також, що для даної методики наявність паразитних смуг на опорній голограмі є несуттєвою.

Розв'язавши систему (3) для кожного з вузлів розміткової сітки, отримуємо три прямокутні матриці переміщень U_x, U_y, U_z , які апроксимуються вздовж розміткових ліній одномірними кубічними сплайнами [5].

Це дає можливість зменшити випадкові осциляції переміщень, що виникають в результаті похибок при визначенні N_i , та аналогічно обчислити похідні від переміщень по координатам для визначення деформацій.

Методика визначення деформацій

На рис. 4 показана клітинка ABCD розміткової сітки, через точку A якої проведемо загальний базис A_{xyz} .

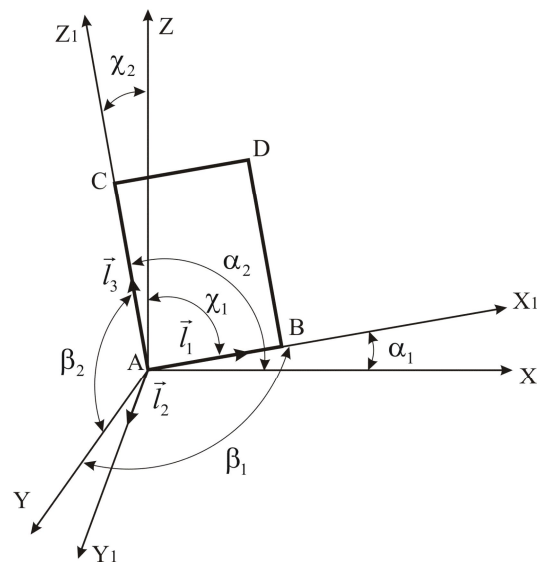


Рис. 4. Клітинка ABCD розміткової сітки із загальним базисом

Місцевий базис виберемо так, щоб вісь x_1 проходила через точки A і B, вісь z_1 через точки A і C, а одиничний орт осі y_1 був перпендикулярний площині векторів \overline{AB} і \overline{AC} .

Оскільки експериментальні значення інтерференційних смуг задаються в загальному базисі, а вели-

чини деформації і напружень визначаються у місцевому, установимо між ними зв'язок.

Знаючи координати точок A, B, C, D в базисі A_{xyz} запишемо напрямні косинуси осей x_1 і z_1 у загальному базисі:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{X_B - X_A}{|AB|}; \\ \cos \alpha_2 &= \frac{X_C - X_A}{|AC|}. \end{aligned} \quad (4)$$

Напрямні косинуси $\cos \beta_1, \cos \gamma_1, \cos \beta_2, \cos \gamma_2$ обчислюються аналогічно.

Запишемо одиничні вектори \vec{e}_1, \vec{e}_3 осей x_1 і z_1 , які задані координатами в загальному базисі:

$$\begin{aligned} \vec{e}_1 &= \{\cos \alpha_1, \cos \beta_1, \cos \gamma_1\}; \\ \vec{e}_3 &= \{\cos \alpha_2, \cos \beta_2, \cos \gamma_2\}. \end{aligned}$$

Нехай в базисі A_{xyz} задано вектор переміщення точки A $\vec{U} = \{U_x, U_y, U_z\}$.

Знайдемо проєкції цього вектора на вісі x_1 і z_1 :

$$\begin{aligned} U_{x_1} &= \vec{U} \cdot \vec{e}_1 = U_x \cos \alpha_1 + U_y \cos \beta_1 + U_z \cos \gamma_1; \\ U_{z_1} &= \vec{U} \cdot \vec{e}_3 = U_x \cos \alpha_2 + U_y \cos \beta_2 + U_z \cos \gamma_2. \end{aligned}$$

Напружено-деформований стан в місцевому базисі вважається плоским. Деформації в точці A визначимо за формулами Коші [6]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x_1} &= \frac{dU_{x_1}}{dx_1}; \varepsilon_{z_1} = \frac{dU_{z_1}}{dz_1}; \\ \gamma_{x_1 z_1} &= \frac{dU_{x_1}}{dz_1} + \frac{dU_{z_1}}{dx_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Після диференціювання переміщень U_{x_1} та U_{z_1} по відповідним координатам отримаємо вираз для деформацій розтягу і зсуву:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x_1} &= \frac{dU_x}{dx} \cdot \cos^2 \alpha_1 + \frac{dU_y}{dx} \cdot \cos \alpha_1 \times \\ &\times \cos \beta_1 + \frac{dU_z}{dx} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \gamma_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z_1} &= \frac{dU_x}{dx} \cdot \cos \gamma_2 \cdot \cos \alpha_2 + \\ &+ \frac{dU_y}{dz} \cdot \cos \gamma_2 \cdot \cos \beta_2 + \frac{dU_z}{dz} \cdot \cos^2 \gamma_2; \\ \gamma_{x_1 z_1} &= \frac{dU_x}{dx} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 + \frac{dU_y}{dx} \cdot \\ &\cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_2 + \frac{dU_z}{dx} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \gamma_2 + \\ &+ \frac{dU_x}{dz} \cdot \cos \gamma_2 \cdot \cos \alpha_1 + \frac{dU_y}{dz} \cdot \cos \gamma_2 \cdot \\ &\cdot \cos \beta_1 + \frac{dU_z}{dz} \cdot \cos \gamma_2 \cdot \cos \gamma_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Напруження в вузлах визначається за формулами (7), в яких E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуассона

$$\begin{aligned} \sigma_{x_1} &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{x_1} + \mu \varepsilon_{z_1}); \\ \sigma_{z_1} &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{z_1} + \mu \varepsilon_{x_1}); \\ \tau_{x_1 z_1} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \gamma_{x_1 z_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

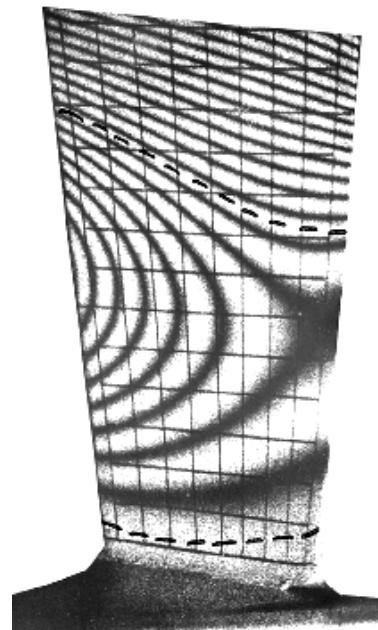


Рис. 5. Інтерферограма лопатки на другій згинній формі коливань (частота $f=4160$ Гц).

Для прикладу на рис. 5 наведена інтерферограма лопатки на другій згинній формі коливань (частота $f=4160$ Гц). Пунктиром відмічені вузлові лінії даної коливальної моди.

На рис. 6 показана нормована еюра деформацій ε_{z_1} , визначена по запропонованій методиці для даної форми коливань вздовж вхідної кромки лопатки в порівнянні з даними електротензометрії. Очевидно, що кореляція результатів є задовільною, що свідчить про їх достовірність.

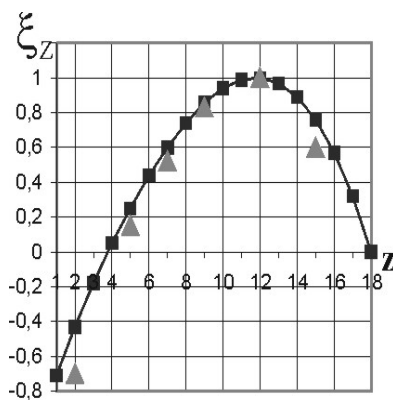


Рис. 6. Нормована еюра деформацій

Висновок

Запропонована методика дослідження деформованого стану лопаток газотурбінних двигунів є достатньо ефективною, має помірну трудомісткість і

може бути особливо корисною при дослідженні високочастотних резонансних вібрацій малогабаритних лопаток, коли застосування класичної електротензометрії проблематично.

Література

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 322 с.
2. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Т.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977. – 414 с.
3. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
4. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 358 с.
5. Волков Е.А. Численные методы. – М.: Наука, 1982. – 530 с.
6. Справочник по теории упругости / Под ред. П.М. Варвака и А.Ф. Рябова. К.: Будівельник, 1971. – 620 с.

Надійшла до редакції 30.05.2007

Рецензент -р техн. наук, проф. Г.В. Павлов, Національний університет кораблебудування, Миколаїв.