

УДК 621.45.037:621.3.018.6

**Канд. техн. наук Г. В. Пухальська<sup>1</sup>, Г. В. Карась<sup>2</sup>,  
В. В. Голощапова<sup>2</sup>, Т. О. Панченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Національний технічний університет, <sup>2</sup> ВАТ «Мотор Січ»; м. Запоріжжя

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЧАСТОТ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ВІДЦЕНТРОВИХ КОЛЕС**

*Рекомендовано діапазон частот власних коливань лопаток відцентрового колеса. Встановлена залежність між частотами власних коливань лопаток відцентрового колеса та площею прошарку матеріалу, що знімається. Розроблено практичні рекомендації по впливу на частоти власних коливань моноколеса.*

**Відцентрове колесо, частоти, власні коливання, лопатка, діапазон**

Профільна частина лопатки відцентрового колеса є тим елементом, відхилення у виготовленні якого призводять до погіршення газодинамічних характеристик компресора. Нерівномірний знос пера лопатки по довжині призводить до зміни віброчастотних характеристик в сторону зсуву частот власних коливань в резонансній зоні, що знижує можливий резерв міцності деталі й всього авіадвигуна [1]. Забезпечення достатньої віброміцності лопаток відцентрового колеса є одним з важливих і найбільш важких завдань в авіаційному двигунобудуванні.

Моноколеса працюють в умовах підвищених температур при статичній і вібраційній напруженості. Тривала дія підвищених температур у поєднанні з механічною напруженістю породжує з часом зміни властивостей сплавів, пов'язані із структурними фізико-хімічними перетвореннями. При цьому з'являються деякі особливості, не властиві сплавам в умовах нормальних температур, а саме: повзучість, релаксація, стомлюваність під дією тривалого статичного навантаження, охрупчуваність.

Вимушені коливання моноколес викликають сили, що виникають унаслідок нерівномірності повітряного потоку в проточній частині двигуна. Чим більше ця нерівномірність, тим більшими будуть амплітуди гармонік й інтенсивність резонансних коливань лопаток, що збуджуються цими гармоніками.

Лопатки відцентрового колеса збуджуються коливаннями декількох форм. Небезпечною формою буде та, власна частота якої при деякому числі обертів співпадає з частотою сил збудження коливань. Частоту коливань можна визначити розрахунковим шляхом або експериментально [2].

Виходячи з вищесказаного, дослідження частот власних коливань відцентрового колеса є актуальним практичним і науковим завданням.

**Мета роботи** – експериментально встановити

діапазон частот власних коливань лопаток відцентрового колеса, надати практичні рекомендації по впливу на частоти власних коливань за допомогою зміни питомої ваги лопаток моноколеса.

Об'єктом дослідження є відцентрове колесо двигуна АИ 450-МС з титанового сплаву ВТ8-1. Блінг компресора по конструкції є цілісним відцентровим колесом напівзакритого типу з одностороннім входом повітря [3].

**Визначення діапазону частот власних коливань лопаток відцентрового колеса**

Внесок різних елементів конструкції робочого колеса в утворенні загальної асиметрії може бути різноманітним. Зрозуміло, що виготовити дискову частину робочого колеса з високим ступенем симетрії легше, ніж забезпечити високий ступінь ідентичності великої кількості однотипних лопаток, що закріплені на ній. Для забезпечення найбільшої динамічної ідентичності лопаток, зокрема, допусків на геометричні розміри, встановлюють жорсткі допуски на деякі їх власні частоти. Частіше це частоти першої форми коливань. Такі частоти контролюють, а лопатки, що не відповідають допуску на частоту, або доопрацьовують, або бракують [4].

Частотний контроль лопаток є:

- а) одним із засобів боротьби з небезпечними коливаннями лопаток;
- б) одним із заходів забезпечення стабільності технології виробництва.

Велике значення для запобігання небезпечним пружним коливанням придбало попереднє визначення частот і форм власних коливань деталі методом штучного їх збудження.

На виробництві визначення частот власних коливань здійснюється за першою формою на універсальній установці для автоматизованого частотного контролю лопаток моноколес ГТД «Мікат-ЧКМ».

Установка призначена для здійснення технологічної операції частотного контролю лопаток моноколес осьових і відцентрових рівнів ГТД.

Установка працює в автоматизованому режимі й забезпечує:

- тестування точності виміру частот за контрольними зразками;
- почергове демпфування всіх лопаток моноколес, окрім тієї, що контролюється;
- автоматичний пошук власної частоти коливань лопатки, що контролюється, з відображенням її на моніторі персонального комп'ютера (ПК) і фіксацію її в пристрої ПК, що запам'ятовує;
- реєстрацію результатів в протоколах частотного контролю.

Відцентрове колесо базується на підставці та здійснюється почергове демпфування великих лопаток (рис. 1).



Рис. 1. Установка для збудження та демпфування лопаток

За період виготовлення відцентрового колеса для двигуна АІ 450-МС з титанового сплаву ВТ8-1, було проконтрольовано 10 колес, кожне з яких має 9 великих лопаток.

При статистичній обробці результатів вимірів використано програмний додаток Excel MS Office для операційної системи Windows та спеціальні програми Agrather та Sigma Plot для операційної

системи Windows 2000.

Було встановлено, що величини частот власних коливань великих лопаток колеса розподілені за нормальним законом розподілу (розподіл Гауса) [5]:

$$m(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (1)$$

$$D(y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [y_i - m(y)]^2, \quad (2)$$

$$S(y) = \sqrt{D(y)}, \quad (3)$$

$$v = \frac{S}{m} * 100, \quad (4)$$

$$y_{\min-2} = (m - 2S), \quad (5)$$

$$y_{\min-3} = (m - 3S), \quad (6)$$

$y_i$  – значення відповідної характеристики  $i$ -го зразка;

$n$  – об'єм вибірки даних;

$m$  – середнє значення відповідної характеристики (вибіркове середнє);

$D$  – незміщена оцінка дисперсії (вибіркова оцінка) відповідної характеристики;

$S = \sqrt{D}$  – середньоквадратичне відхилення характеристики;

$v$  – коефіцієнт варіації, %;

$y_{\min-3} = (m - 3S)$  – мінімальне значення відповідної характеристики;

$y_{\min-2} = (m - 2S)$  – одне з мінімальних значень відповідної характеристики.

Вихідні дані та результати розрахунків наведені в таблицях 1, 2.

На основі статистичної обробки експериментальних даних, одержаних в процесі виробництва колеса, побудовано графік нормальної щільності розподілу (рис. 2) і визначено, що вибірка підкоряється нормальному закону розподілу. Були визначені величини середнього значення частоти власних коливань лопаток відцентрового колеса  $m(y) = 2838,11$  Гц і середньоквадратичного відхилення  $S = 21,58$  Гц для всієї вибірки.

Таблиця 1 – Частоти власних коливань лопаток відцентрових колес

№ колеса	Частоти власних коливань лопаток, Гц								
	№ лопатки відцентрового колеса								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2728,5	2798,3	2810,2	2811	2814,9	2817,9	2818,1	2819,4	2819,6
2	2820	2820,7	2823,4	2824,9	2827,2	2827,8	2827,9	2828,1	2829,3
3	2829,8	2830,7	2830,8	2831,4	2831,6	2831,8	2832,2	2832,6	2833,3
4	2833,4	2834,1	2834,2	2834,2	2834,8	2835	2835,1	2835,3	2835,9
5	2836,5	2836,8	2838	2838,3	2838,3	2838,7	2839,5	2839,9	2840
6	2842,1	2842,3	2842,4	2842,6	2843	2843,7	2843,7	2843,8	2843,9
7	2844	2844,7	2844,9	2845,1	2845,5	2845,7	2846	2846,1	2847,9
8	2848,6	2848,7	2848,7	2849,2	2849,5	2849,6	2849,8	2850	2850,6
9	2850,6	2850,9	2852	2852,1	2852,2	2852,2	2852,3	2852,7	2852,7
10	2852,8	2853,9	2854,1	2854,2	2855	2856,2	2859,2	2859,7	2865,5

**Таблиця 2** – Результати статистичної обробки експериментальних даних

Розмір вибірки ( $n$ ), шт.	90
Середнє значення частоти коливань ( $m$ ), Гц	2838,11
Середньоквадратичне відхилення ( $S$ ), Гц	21,58
$m-2*S$	2796,07
$m-3*S$	2774,49

Оскільки на даний момент на виробництві не встановлено діапазон для контролю частот власних коливань, то необхідно визначити його межі. Це можливо зробити за допомогою аналізу кривої й перевірки на аномальність випадних значень.

В результаті статистичної обробки експериментальних даних одержано діапазон частот власних коливань лопаток відцентрового колеса двигуна АИ 450-МС: 2775...2905 Гц.

**Доведення лопаток відцентрового колеса**

Час та гроші, що витрачаються на забезпечення надійності колес новостворюваних компресорів, займають значне місце у загальному балансі часу та засобів, що йдуть на доводку та впровадження в експлуатацію [4]. Проблема динамічної міцності дуже складна та багатогранна.

В процесі серійного виробництва виникає необхідність у доведенні лопаток з метою введення частот власних коливань лопаток у припустимий діапазон шляхом зміни питомої ваги лопатки колеса. Головна задача: лопатка повинна залишатися придатною (знаходитися в полі допуску), а частота повинна змінитися (збільшитися чи зменшитися на необхідну величину). На сьогоднішній день не існує практичних рекомендацій по здійсненню даної задачі. Тому існує необхідність дослідження по доведенню частот власних коливань лопаток відцентрового колеса.

Попередньо було зазначено, як здійснювати контроль частот власних коливань лопаток вже виго-

товленого колеса і визначити діапазон контролю.

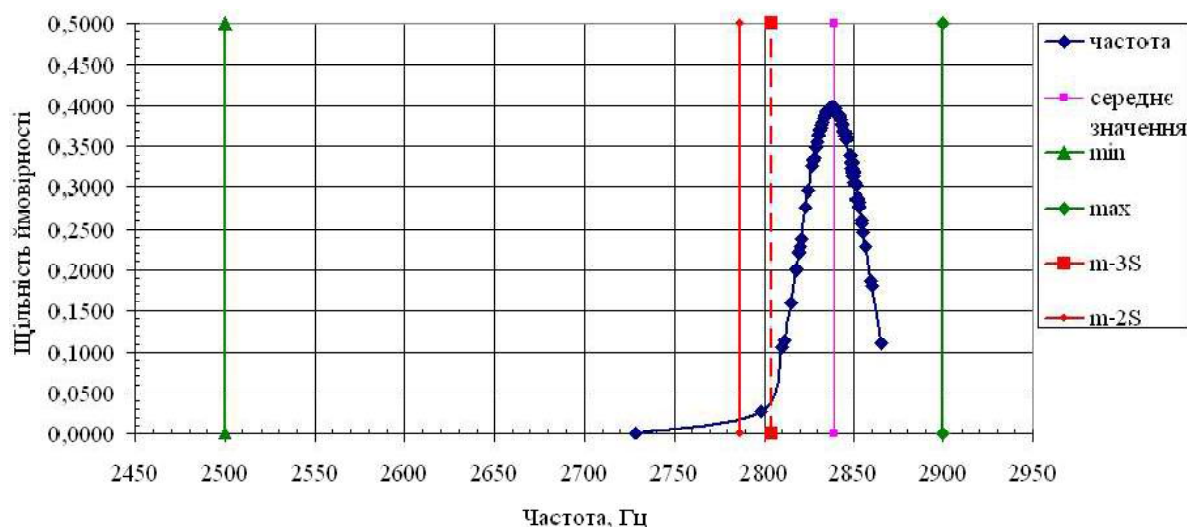
Для розробки рекомендацій по впливу на частоти власних коливань було використано відцентрове колесо, контроль геометричних параметрів якого здійснювався на трикоординатній контрольно-вимірній машині (КВМ) Wenzel LH-87 методом сканування (рис. 3, 4); контроль частот власних коливань на установці «Мікат-ЧКМ».

Вимірювання проводяться у декілька етапів:

1. Вибір параметрів роботи: запуск програми, вибір параметрів випробування, настройка контрольно-вимірної машини (рис. 3).
  2. Визначення геометричних параметрів контролюємих лопаток відносно математичної моделі відцентрового колеса.
  3. Визначення частот власних коливань випробовуваних лопаток.
  4. Отримання результату (друк протоколу).
- Потім почергово з кожної лопатки в певному місці знімався невеликий прошарок металу (рис. 5).



**Рис. 3.** Контрольно-вимірвальна машина Wenzel LH-87



**Рис. 2.** Закон нормального розподілу частот власних коливань великих лопаток відцентрового колеса за першою формою

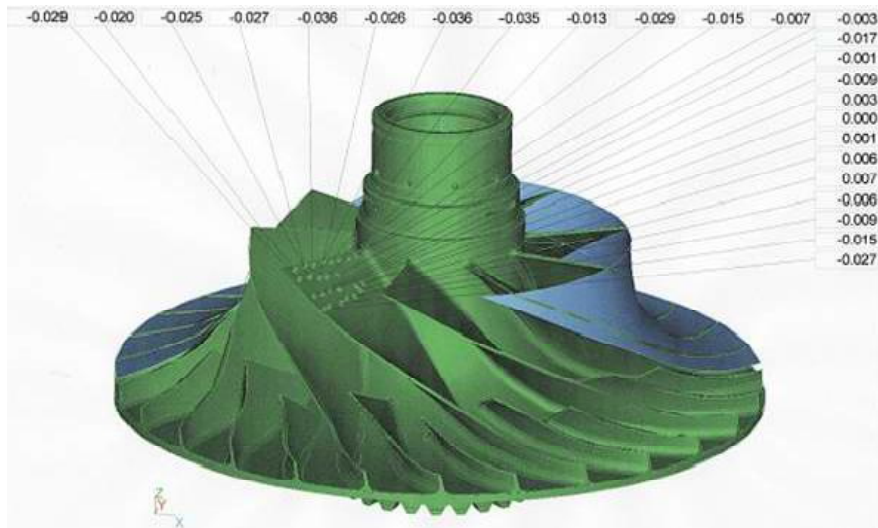
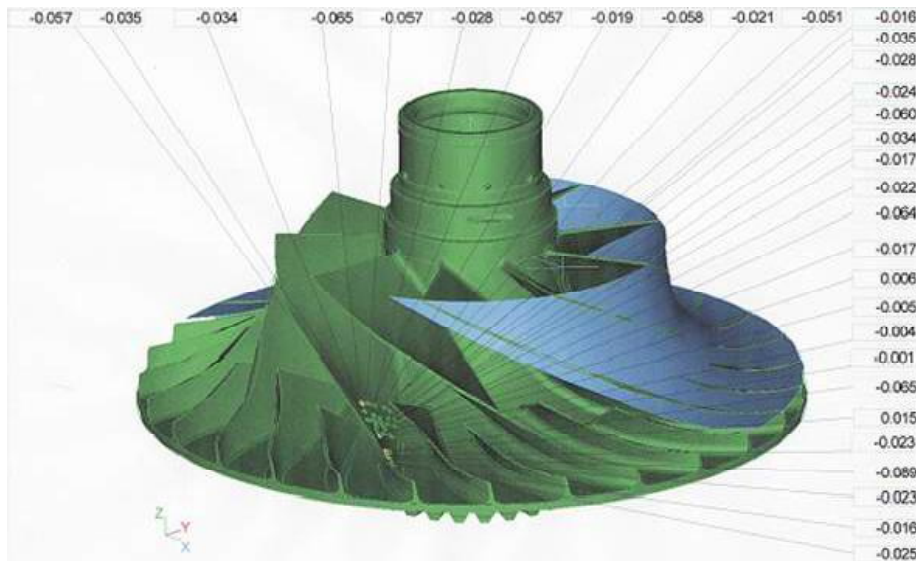
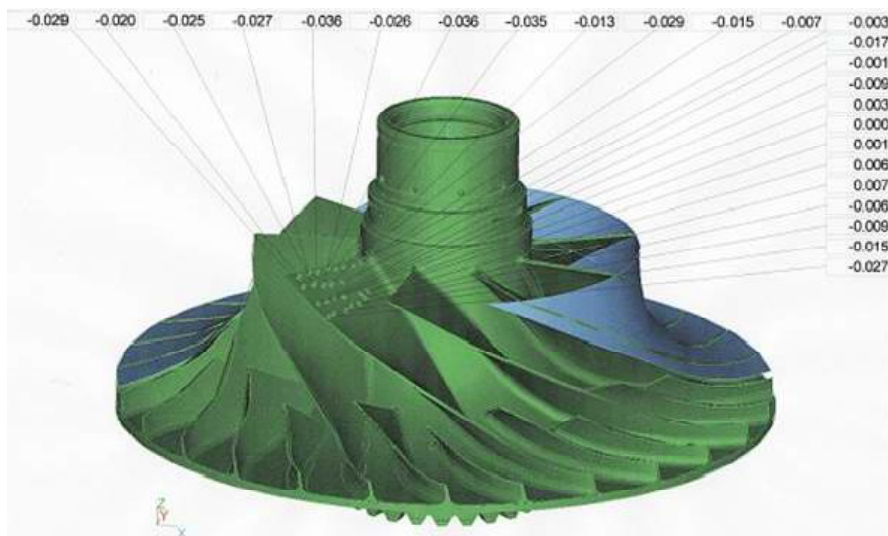


Рис. 4. Налаштування контрольно-виміральної машини



*a*



*б*

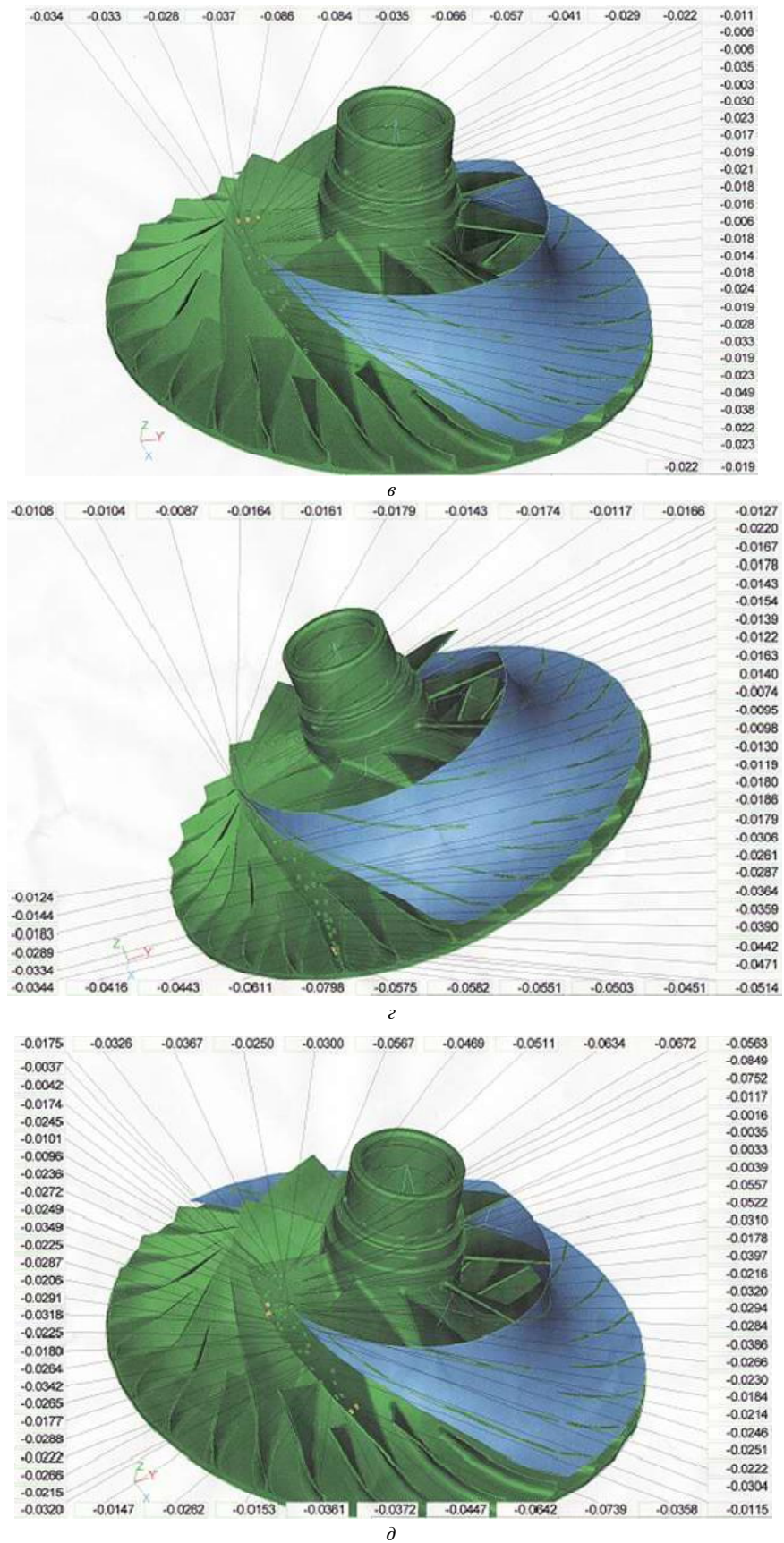


Рис. 5. Результаты контролю геометричних параметрів колеса на контрольно-вимірювальній машині (КВМ) Wenzel LH-87 методом сканування

Було встановлено, що якщо знімати його з верхньої частини пера, частота збільшується, а якщо з нижньої – зменшується (рис. 6).

Після знімання прошарку металу знову проводився контроль геометрії на контрольно-вимірювальній машині та контроль частоти на уні-

версальній установці для автоматизованого частотного контролю лопаток моноколес «Мікат-ЧКМ».

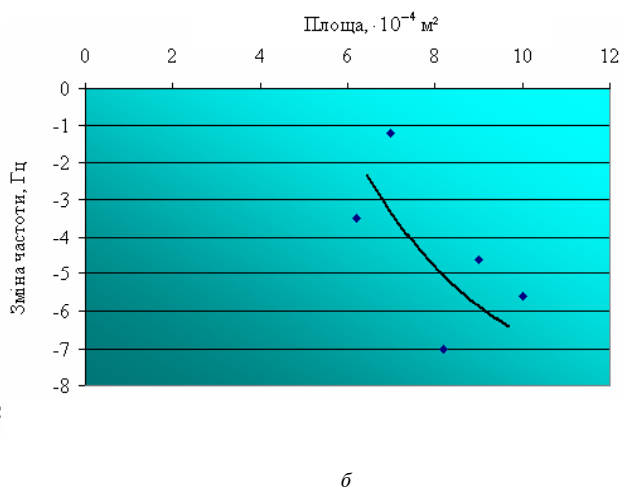
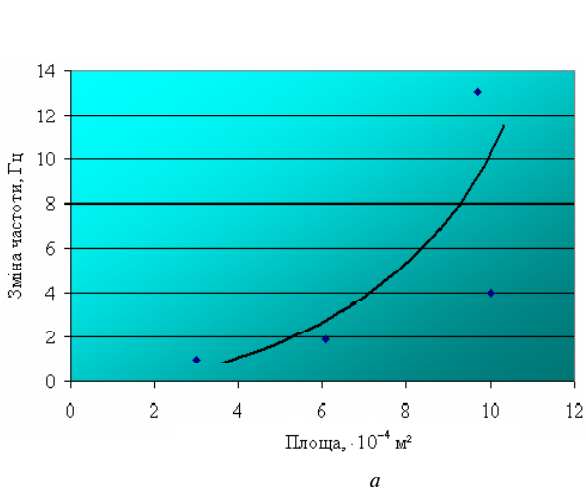
Результати проведеної роботи відображені на графіках залежності зміни частоти від площі прошарку металу, що знімається (рис. 7).



**Рис. 6.** Позначення місць знімання прошарку матеріалу при доведенні частот власних коливань:  
*a* – верхня частина пера великої лопатки відцентрового колеса, *б* – нижня частина

**Таблиця 3** – Результати вимірів частот власних коливань лопаток

№ лопатки	Частота до доопрацювання, Гц	Відхилення, %	Частота після доопрацювання, Гц	Відхилення, %	Зміна частоти, Гц	Площа металу, $\times 10^{-4} \text{ м}^2$
1	2822,6	+0,1	2826,1	+0,1	-3,5	6,2
2	2831,0	+0,1	2827,0	+0,1	4	10,0
2	2827,0	+0,1	2834,0	+0,1	-7	8,2
3	2832,7	+0,1	2838,3	+0,1	-5,6	10,0
4	2837,8	+0,1	2839,0	+0,1	-1,2	7,0
5	2833,8	+0,1	2838,4	+0,0	-4,6	9,0
6	2832,5	+0,1	2831,5	+0,0	1	3,0
7	2834,1	+0,1	2821,1	+0,1	13	9,7
8	2881,5	+0,1	2879,6	+0,1	1,9	6,1



**Рис. 7.** Залежність зміни частот власних коливань лопаток відцентрового колеса від площі прошарку металу, що знімається:  
*a* – з верхньої частини пера великої лопатки; *б* – з нижньої частини пера

Відцентрові колеса є достатньо складними і дорогими деталями авіаційних ГТД; власна частота лопаток є комплексним критерієм побічної оцінки точності виготовлення лопаток моноколеса. Тому найбільш ефективним методом введення власних частот лопаток відцентрового колеса в припустимий діапазон є їх доопрацювання.

Згідно з проведеними дослідженнями можна надати такі практичні рекомендації:

- якщо знімати прошарок металу з верхньої частини пера лопатки, то частота збільшується, а з нижньої – зменшується. Місця знімання прошарку матеріалу при доведенні власних частот коливань приведені на рис. 6;

- отримані залежності зміни частот власних коливань лопаток відцентрового колеса від площі прошарку металу, що знімається, які можна використовувати на виробництві для уникнення бракування відцентрових колес.

#### Висновки

Внаслідок проведеної роботи рекомендовано діапазон частот власних коливань лопаток відцентрового колеса двигуна АІ 450-МС (2775...2905 Гц).

Проведено дослідження доопрацювання лопаток відцентрових колес з метою забезпечення необхідної частоти власних коливань лопаток і запропоновано практичні рекомендації по впливу на частоти власних коливань лопаток відцентрового колеса за першою формою.

#### Перелік посилань

1. Отбор геометрических параметров и синтез модели частотной характеристики лопаток компрессора на основе эволюционного

- поиска / [Богуслаев А. В., Олейник А. А., Пухальская Г. В., Субботин С. А.] // Вестник двигателестроения – 2006. – № 1 – 160 с.
2. Басов К. А. ANSYS : справочник пользователя / Басов К. А. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с., ил.
  3. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.] – Запорожье, изд-во ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
  4. Иванов В. П. Колебания рабочих колес турбомашин. / Иванов В. П. – М. : Машиностроение, 1983. – 224 с., ил.
  5. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. / Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. – М. : Наука, 1969. – 511 с.
  6. Богуслаев В. А. Прочность деталей ГТД : монография / Богуслаев В. А., Жуков В. Б., Яценко В. К. – Запорожье, изд-во ОАО «Мотор Сич», 1999. – 249 с.
  7. Обеспечение допустимого уровня разноточности лопаток центробежных колес / [Краченко И. Ф., Шереметьев А. В., Петров А. В., Хромов В. А.] // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – 160 с.
  8. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Скубачевский Г. С. – М. : Машиностроение, 1974. – 520 с.
  9. D. S. Whitehead M.A., Ph.D., A.M.I. Mech, A.F.R.Ae.S. Cambridge University Engineering Laboratory. The Analysis of Blade Vibration due to Random Excitation. Aeronautical research council report and memoranda / D. S. Whitehead. – London : Her Majesty stationary office, 1962. – 16 p.

Поступила в редакцию 22.02.2010

**G. V. Pukhal's'ka, G. V. Karas, V. V. Goloschapova, T. O. Panchenko**

### PROVISION OF FREE FREQUENCIES IN PRODUCTION OF CENTRIFUGAL WHEELS

*Рекомендован диапазон частот собственных колебаний центробежного колеса. Установлена зависимость между частотами собственных колебаний лопаток центробежного колеса и площадью снимаемого слоя материала. Разработаны практические рекомендации по влиянию на частоты собственных колебаний моноколеса.*

#### **Центробежное колесо, частоты, собственные колебания, лопатка, диапазон**

*There was recommended range of free frequencies of the centrifugal wheel's blades. There was determined dependence between free frequencies of the centrifugal wheel's blades and the area of removed layer of material. There are developed practical recommendations concerning influence upon free frequencies of the blisk.*

#### **Centrifugal wheel, frequencies, free frequencies, blade, range**