

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Невдаха Андрій Юрійович

УДК 621.4.002.2:629.73.002.72

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ
СКЛАДАННЯ МІЖОПОРНИХ РОТОРІВ БАРАБАННО-
ДИСКОВОГО ТИПУ МЕТОДОМ ДВОХ ПРОБНИХ
СКЛАДАНЬ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Кіровоградському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Філімоніхін Геннадій Борисович**, Кіровоградський національний технічний університет, професор кафедри деталей машин та прикладної механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Гурей Ігор Володимирович**, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри технології машинобудування;

кандидат технічних наук, доцент **Тараховський Олексій Юрійович**, Севастопольський національний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування.

Захист відбудеться „28” листопада 2013 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д35.052.06 при Національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, навчальний корпус №14, ауд.61.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “ ___ ” жовтня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.П. Шоловій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У літакобудуванні широко використовуються газотурбінні двигуни (ГТД) з роторами барабанно-дискового типу (БДТ). В Україні вони розробляються на ДП "Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро "Прогрес" ім. академіка А.Г. Івченка (ДП "Івченко-Прогрес") та виготовляються на ВАТ "Мотор Січ", м. Запоріжжя.

Кінцеве складання роторів БДТ у вигляді з'єднання між собою окремих деталей, складальних одиниць ротора – робочих коліс, нероз'ємних секцій із декількох робочих коліс, дисків, проставок, валів тощо (що умовно об'єднуються в ланки) – найбільш відповідальний етап складання, бо саме на ньому формується геометрична вісь і вісь обертання ротора. Але це – багатоваріантний процес, бо окремі деталі ротора осесиметричні і можуть з'єднуватися між собою із різними кутами взаємного повороту.

Найбільш перспективна технологія оптимального складання роторів БДТ заснована на методі двох пробних складань. Проте вона більш ефективна при складанні консольних, ніж міжпорних роторів, оскільки биття контрольних поверхонь (КП) заміряються на поворотному складальному стапелі (ПСС), що відповідає консольному встановленню ротора. Тому для підвищення якості складання міжпорних роторів актуально розробити технологію оптимального складання міжпорних роторів БДТ, засновану на методі двох пробних складань з заміром биття на призмах, що відповідатиме встановленню ротора на дві опори. За допомогою 3D моделювання та натурної установки провести апробацію методів двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах при складанні консольних та між опорних роторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Кіровоградському національному технічному університеті відповідно до держбюджетних тем "Динаміка оберткових тіл з автобалансирами", держреєстрація № 0108U001326, період виконання 2008-2009 рр., "Зрівноваження і віброзахист оберткових тіл", держреєстрація № 0112U001108, період виконання 2012-2014 рр., та планами наукових робіт кафедри деталей машин та прикладної механіки.

Метою роботи є: технологічне забезпечення якості складання міжпорних роторів БДТ методом двох пробних складань.

Задачі досліджень:

- 1) розробити типовий техпроцес складання міжпорних роторів БДТ методом двох пробних складань з заміром биття на призмах;
- 2) розробити відповідну математичну модель техпроцесу;
- 3) розробити математичні алгоритми розрахунків, що забезпечують типовий техпроцес і придатні для програмування;
- 4) скласти програму для проведення розрахунків на ПК;
- 5) 3D моделюванням провести апробацію розробленого типового техпроцесу, математичних алгоритмів розрахунків і програми;
- 6) 3D моделюванням дослідити вплив на величини оптимальних кутів

поворотів ланок ротора неточностей заміру биття їх КП;

7) експериментально порівняти між собою якості складання роторів БДТ, що досягаються методом довільної установки дисків, методами двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси складання роторів БДТ.

Предмет дослідження: типові техпроцеси складання роторів БДТ, їх математичні моделі, які забезпечують алгоритми розрахунків.

Наукова новизна одержаних теоретичних результатів:

1) вперше розроблений типовий техпроцес складання міжпорних роторів БДТ методом двох пробних складань з заміром биття на призмах який складається з операцій визначення характеристик пар та оптимального складання ротора;

2) вперше розроблена математична модель визначення характеристик пар міжпорного ротора БДТ встановленого на призми;

3) вперше розроблена математична модель разового віртуального складання міжпорного ротора БДТ, що містить етап віртуального складання ротора на ПСС та етап віртуальної перестановки ротора з ПСС на призми;

4) вперше розроблені машино-орієнтовані математичні алгоритми розрахунків, що обслуговують процес складання міжпорних роторів БДТ методом двох пробних складань.

Достовірність отриманих результатів забезпечує застосування методів технології машинобудування, елементів теорії машин та механізмів, апарату комплексної алгебри. Отримані теоретичні результати перевірені розрахунками на ПК в MathCad, Borland Delphi, 3D моделюванням у САПР SolidWorks і натурними експериментами.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена технологія дозволяє точно і якісно складати міжпорні і консольні ротори БДТ без використання додаткових пристосувань, унікальних для кожного ротора ГТД. Розроблений типовий техпроцес є теоретичною основою для розробки виробничих техпроцесів складання міжпорних роторів БДТ конкретних ГТД. Розроблена комп'ютерна програма, що дозволяє обслуговувати розрахунками техпроцеси складання будь-яких консольних та міжпорних роторів БДТ із заміром биття як на ПСС, так і на призмах.

Експериментально встановлено, що для забезпечення найбільш якісного складання роторів БДТ методом двох пробних складань необхідно консольні ротори складати із заміром биття на ПСС, а міжпорні – на призмах.

Встановлено, що під час заміру биття КП ланок ротора похибки розташування ніжки індикатора у межах ± 6 мм по довжині ротора, чи $\pm 6^\circ$ при обертанні ротора не впливають на величини розрахованих оптимальних кутів поворотів ланок, за умови, що кількість призових болтів, що з'єднують дві ланки у кожній парі, не більша за 32.

Розроблена технологія апробована на ДП "Івченко-Прогрес" при складанні роторів авіаційних ГТД Д18-Т, Д-36, АІ-222 та їх модифікацій. Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри

деталей машин та прикладної механіки КНТУ і увійшли у заключний звіт №0210U003265 з держбюджетної теми „Динаміка обертових тіл з автобалансирами”.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, що відносяться до наукової новизни, отримано особисто здобувачем. У роботах із співавторами здобувачем: [1], [7] – розроблена матмодель техпроцесу віртуального складання міжопорних роторів БДТ; [2] – створена натурна модель типового ротора БДТ, ПСС та призми; [3] – створена 3D модель типового ротора БДТ, написана програма для розрахунків; [5,6] – розроблений типовий техпроцес складання міжопорних роторів БДТ методом двох пробних складань з заміром биття на призмах; [8] – 3D моделюванням апробовані технології складання роторів БДТ за методом двох пробних складань.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертації обговорювалися на: 9-му міжнародному симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові (2009); 2-ій міжнародній науковій конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Інженерна механіка та транспорт 2011" при Національному університеті "Львівська політехніка" (2011); 7-ій міжнародній науково-практичній конференції "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2012", Чернігів-Жукин (2012); 3-ій міжнародній науково-технічній конференції "Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій" при Національному університеті "Львівська політехніка" (2012).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць: 5 наукових статей у фахових виданнях України; 4 тез доповідей.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, 2 додатків. Вона включає 138 сторінок тексту, 35 рисунки, 22 таблиці, 2 додатки, викладені на 10 сторінках та список використаних джерел з 105 найменувань. Загальний обсяг дисертації – 155 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** зазначена актуальність теми дисертації, формуються мета та задачі дослідження, подається загальна характеристика роботи.

У **Розділі 1 "Стан питання, мета та задачі досліджень"** проведено огляд літератури з зазначеної тематики. Ним, зокрема, встановлено що розробці технологій кінцевого, оптимального складання роторів БДТ присвячені роботи Без'язичного В.Ф., Єрошкова Ю.В., Ільїної М.Е., Качана О.Я., Кондратюка Е.В., Кравченка І.Ф., Непомилуєва В.В., Пейчева Г.І., Тітова В.А., Філімоніхіна Г.Б. тощо. Найбільш перспективна технологія, заснована на методі двох пробних складань, що розроблена в роботах Кондратюка Е.В., Тітова В.А., Філімоніхіна Г.Б. Вона, зокрема, містить типові техпроцеси, їх математичні моделі, алгоритми розрахунків, комп'ютерну програму для розрахунків. За цією технологією ротор БДТ розбивається на ланки, двічі пробно складається з певним взаємним

розворотом ланок, після кожного пробного складання на поворотному складальному стапелі (ПСС) заміряються биття контрольних поверхонь (КП) ланок, потім ротор складається третій раз – остаточно, з оптимальними взаємними розворотами ланок, розрахованими за певним алгоритмом. Така технологія не потребує для кожної деталі ротора додаткових пристосувань (центрувальних, притискних, перехідних контрольних тощо) і найбільш ефективна, бо характеристики пар визначаються безпосередньо, а не розраховуються за величинами биття посадочних поверхонь ланок (як у інших технологіях, у яких створюються інформаційні моделі деталей). Проте вона більш ефективна при складанні консольних, ніж міжпорних роторів, оскільки биття КП заміряються на ПСС, де реалізується консольне закріплення ротора. До того ж така технологія потребує для кожної моделі ротора унікального, якісного центрувального пристосування для закріплення на ПСС без ексцентриситету і перекосу першої ланки ротора.

З іншого боку для заміру биття КП міжпорного ротора широко використовуються призми, що реалізують встановлення ротора на дві опори. Одне таке пристосування придатне для роторів будь-якого розміру, дає однакові биття КП ротора незалежно від кількості його перестановок на призми, не вимогливе до температури ротора чи оточуючого середовища.

З використанням проведеного огляду обґрунтовані сформульовані у вступі мета та задачі досліджень.

У **Розділі 2 "Методи досліджень"** обрані методи досліджень та визначена послідовність розв'язання ними поставлених задач. Докладніше це розкрито у описі відповідних розділів.

Розділі 3 "Технологія оптимального складання роторів БДТ методом двох пробних складань із заміром биття на призмах".

У **п. 3.1** розроблений типовий техпроцес оптимального складання роторів БДТ методом двох пробних складань із заміром биття на призмах. Він є теоретичною основою для розробки виробничих техпроцесів оптимального складання міжпорних роторів БДТ конкретних ГТД.

На вході техпроцесу роторний комплект із N ланок (що утворюють $N-1$ пар), а на виході – точно і оптимально складений ротор. Дві ланки n_s і m_s , що утворюють пару s , $/s = \overline{1, N-1}/$ з'єднуються між собою np_s стяжками чи призонними болтами. Тому кут повороту φ_s ланки n_s щодо ланки m_s змінюється дискретно із кроком $\Delta\varphi_s = 360^0 / np_s$ і ланки можуть бути з'єднані у np_s варіантах. Загальна кількість варіантів складання ротора:

$$n_{\Sigma} = np_1 \times \dots \times np_{N-1}. \quad (1)$$

Ротор вважається складеним точно, якщо модулі векторів ексцентриситетів e_k і перекосів δ_k його ланок не перевищують допустимих величин:

$$|e_k| \leq e_{\max_k}, \quad |\delta_k| \leq \delta_{\max_k}, \quad /k = \overline{1, N}/. \quad (2)$$

Якщо ротор консольний, то положення його ланок в роторному пакеті визначаються на ПСС, а якщо міжпорний, то – на призмах.

Кожен варіант складання ротора однозначно визначається набором відносних кутів повороту ланок $\varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}$. Певний варіант складання ротора, що визначається відносними кутами $\varphi_1^*, \dots, \varphi_{N-1}^*$, називається оптимальним, якщо ротор на ньому складений точно і певний функціонал якості Q приймає на ньому мінімальне значення Q^* .

$$\text{Функціонал якості має вигляд: } Q = \sum_{k=1}^N \{\mu_k |e_k| + \nu_k |\delta_k|\}, \quad (3)$$

де μ_k, ν_k – сталі коефіцієнти. Як правило він є сумою модулів розподілених дисбалансів і тоді коефіцієнти μ_k, ν_k виражаються через маси ланок і їх моменти інерції.

Типовий техпроцес керує діями робітників і містить дві операції: 1) визначення характеристик пар; 2) оптимального складання ротора.

Розгорнута блок-схема операції 1 наведена на рис. 1, а. Під час її виконання до табл. 1 заносяться величини биття КП ланок ротора (визначені за ОСТ 1.41672-77):

еталоні ($j=0$, якщо КП ланок не прив'язані до головних центральних осей інерції ланок); після першого ($j=1$) та другого ($j=2$) пробного складання (переходи 1.4, 1.5 на рис. 1, а).

Табл. 1. Биття КП ланок ротора, мм

Ланка №	$\Delta 3_{k,j}$	$\Delta 4_{k,j}$	$\delta 3_{k,j}$	$\delta 4_{k,j}$
$k, / k = \overline{1, N} /$				

Розгорнута блок-схема операції 2 наведена на рис. 1, б.

У п.3.2 описуються математичні моделі і алгоритми розрахунків, що обслуговують розроблений типовий техпроцес.

За даними із табл. 1 визначаються характеристики пар – закони зміни ексцентриситету та перекосу ланки n_s щодо ланки m_s , встановленої без ексцентриситету та перекосу, в парі номер s в залежності від кута повороту φ_s ланки n_s щодо ланки $m_s, / s = \overline{1, N-1} /$:

$$e_{n_s}(\varphi_s) = ecp_{n_s} + \Delta e_{n_s} e^{-i\varphi_s}, \quad \delta_{n_s}(\varphi_s) = \delta cp_{n_s} + \Delta \delta_{n_s} e^{-i\varphi_s}, \quad (4)$$

де e_{n_s}, δ_{n_s} – відповідно ексцентриситет та перекіс КП ланки n_s ;

$$ecp_{n_s} = \frac{e''_{n_s,1} + e''_{n_s,2}}{2}, \quad \Delta e_{n_s} = \frac{e''_{n_s,1} - e''_{n_s,2}}{2}, \quad \delta cp_{n_s} = \frac{\delta''_{n_s,1} + \delta''_{n_s,2}}{2}, \quad \Delta \delta_{n_s} = \frac{\delta''_{n_s,1} - \delta''_{n_s,2}}{2},$$

$$e''_{n_s,j} = e_{n_s,j}(-1)^{j-1} - e_{m_s,j} - \frac{l_s}{2r_{m_s}} \delta_{m_s,j}, \quad \delta''_{n_s,j} = \delta_{n_s,j}(-1)^{j-1} - \delta_{m_s,j}, \quad / j = \overline{1, 2} /,$$

$$i \quad e_{k,j} = ex_{k,j} + iey_{k,j}, \quad \delta_{k,j} = \delta x_{k,j} + i\delta y_{k,j},$$

$$ex_{k,j} = -(\Delta 3_{k,j} - \Delta 3_{k,0})/2, \quad ey_{k,j} = -(\Delta 4_{k,j} - \Delta 4_{k,0})/2,$$

$$\delta x_{k,j} = \delta 3_{k,j} - \delta 3_{k,0}, \quad \delta y_{k,j} = \delta 4_{k,j} - \delta 4_{k,0}, \quad / k = \overline{1, N}; j = \overline{1, 2} /.$$

Ці формули відрізняються від формул, відомих з робіт Кондратюка Е.В., Тітова В.А., Філімоніхіна Г.Б. тим, що враховують биття першої ланки.

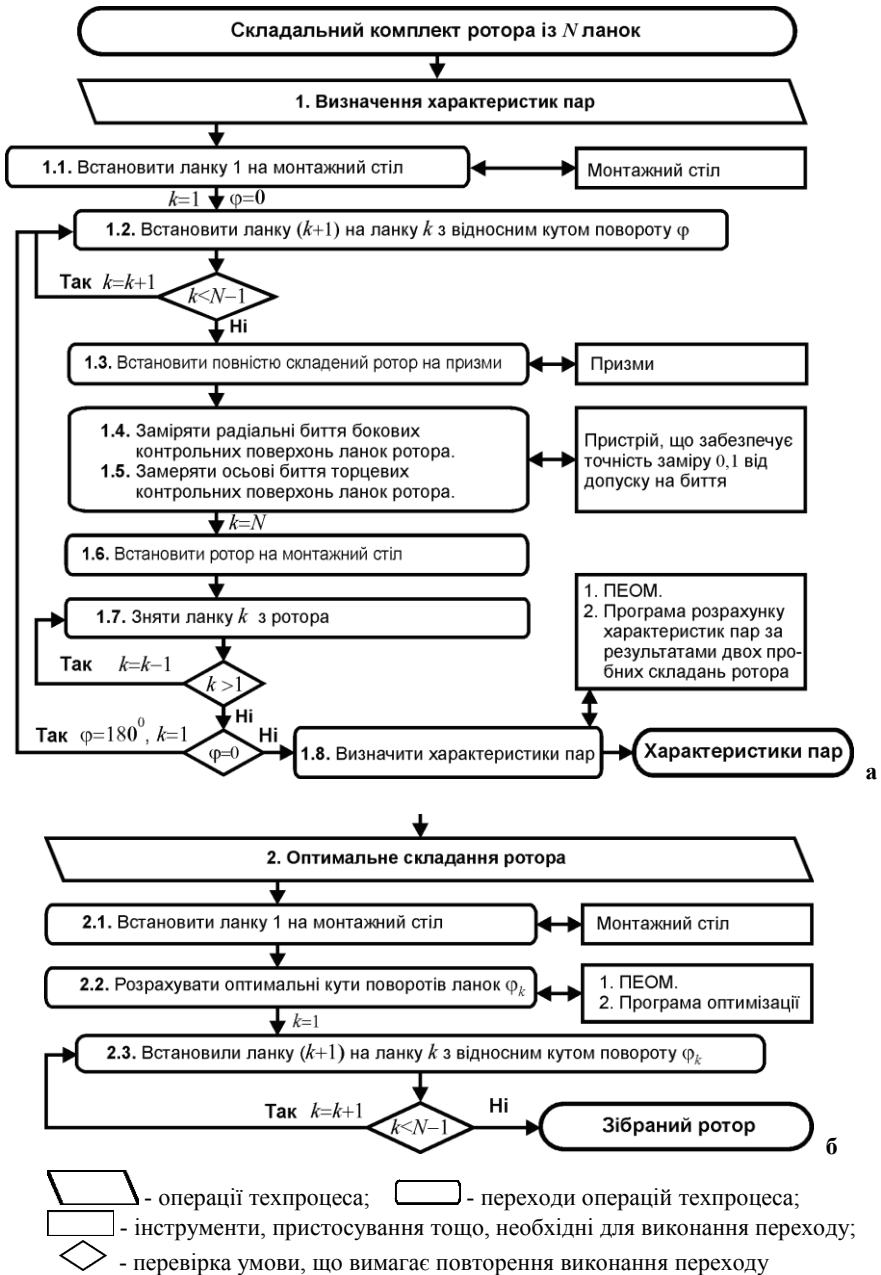


Рис. 1. Розгорнуті блок-схеми операцій:

1 – визначення характеристик пар (а); 2 – оптимального складання ротора (б)

Математичне моделювання процесу разового складання міжопорного ротора БДТ за характеристиками пар реалізується в два етапи.

Етап 1 – віртуальне складання ротора на ПСС (як консольного); описують відомі з робіт Кондратюка Е.В., Тітова В.А., Філімоніхіна Г.Б. рекурентні співвідношення:

$$e_1^{(c)} = 0, \quad \delta_1^{(c)} = 0; \quad e_2^{(c)}(\psi_1) = ecp_2 + \Delta e_2 e^{-i\psi_1}, \quad \delta_2^{(c)}(\psi_1) = \delta cp_2 + \Delta \delta_2 e^{-i\psi_1};$$

$$e_k^{(c)}(\psi_1, \dots, \psi_{k-1}) = ecp_k e^{-i\psi_{k-2}} + \Delta e_k e^{-i\psi_{k-1}} + e_{k-1}^{(c)}(\psi_1, \dots, \psi_{k-2}) - \frac{l_{k-1}}{2r_{k-1}} \delta_{k-1}^{(c)}(\psi_1, \dots, \psi_{k-2}),$$

$$\delta_k^{(c)}(\psi_1, \dots, \psi_{k-1}) = \delta cp_k e^{-i\psi_{k-2}} + \Delta \delta_k e^{-i\psi_{k-1}} + \frac{r_k}{r_{k-1}} \delta_{k-1}^{(c)}(\psi_1, \dots, \psi_{k-2}), \quad /k = \overline{3, N}/, \quad (5)$$

де $\psi_s = \varphi_1 + \dots + \varphi_s$, r_k – радіуси торцевих КП ланок, l_s – відстані між КП $/s = \overline{1, N-1}/$, $/k = \overline{1, N}/$.

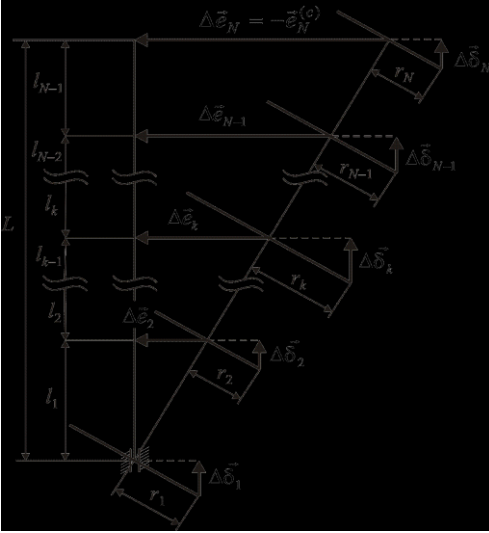


Рис. 2. Зміна ексцентриситетів та перекосів ланок ротора при перестановці ротора з ПСС на призми

Етап 2 – віртуальне встановлення ротора на призми (рис. 2), при якому ексцентриситети і перекоси ланок одержують нові значення:

$$e_k = e_k^{(c)} + \Delta e_k, \quad \delta_k = \delta_k^{(c)} + \Delta \delta_k, \quad /k = \overline{1, N}/, \quad (6)$$

де $\Delta e_1 = 0$,

$$\Delta e_k = -e_N^{(c)} \cdot \left(\sum_{i=1}^{k-1} l_i \right) / L, \quad L = \sum_{i=1}^{N-1} l_i, \quad /k = \overline{2, N-1}/, \quad \Delta e_k = -e_N^{(c)},$$

$$\Delta \delta_k = e_N^{(c)} r_k / L, \quad /k = \overline{1, N}/,$$

Одержані формули прогнозу радіального і торцевого биття КП ланок ротора (що дозволяють контролювати процес складання ротора):

$$\Delta_k^{(np)} = -2e_k e^{-i\psi_{k-1}} + \Delta 3_{k,0} + i\Delta 4_{k,0},$$

$$\delta_k^{(np)} = -\delta_k e^{-i\psi_{k-1}} + \Delta 3_{k,0} + i\Delta 4_{k,0}, \quad /k = \overline{1, N}/. \quad (7)$$

У п.п. 3.3 розроблені алгоритми розрахунків, що забезпечують оптимальне складання роторів БДТ методом двох пробних складань із заміром биття на призмах. На рис. 3 наведена укрупнена блок-схема алгоритму розв'язання задачі. Величини в схемі визначені вище. Задача оптимізації розв'язується методом повного перебору.

Укрупнена блок-схема складається із блоків: введення розрахункових даних; розрахунку характеристик пар; визначення кутів повороту ланок за

номером i варіанту складання ротора; віртуального складання ротора на ПСС; віртуального переустановлення ротора з ПСС на призми; перевірки обмежень на биття; розрахунку функціоналу якості; запам'ятовування нових оптимальних кутів повороту ланок і значення функціоналу якості, виводу результатів розрахунків.

У п.3.4 наводяться розгорнуті блок-схеми і алгоритми окремих блоків, що входять в укрупнену блок-схему на рис. 3. Вони придатні для програмування із застосуванням будь-якої алгоритмічної мови і масштабовані, тобто придатні для роторів з довільною кількістю ланок.

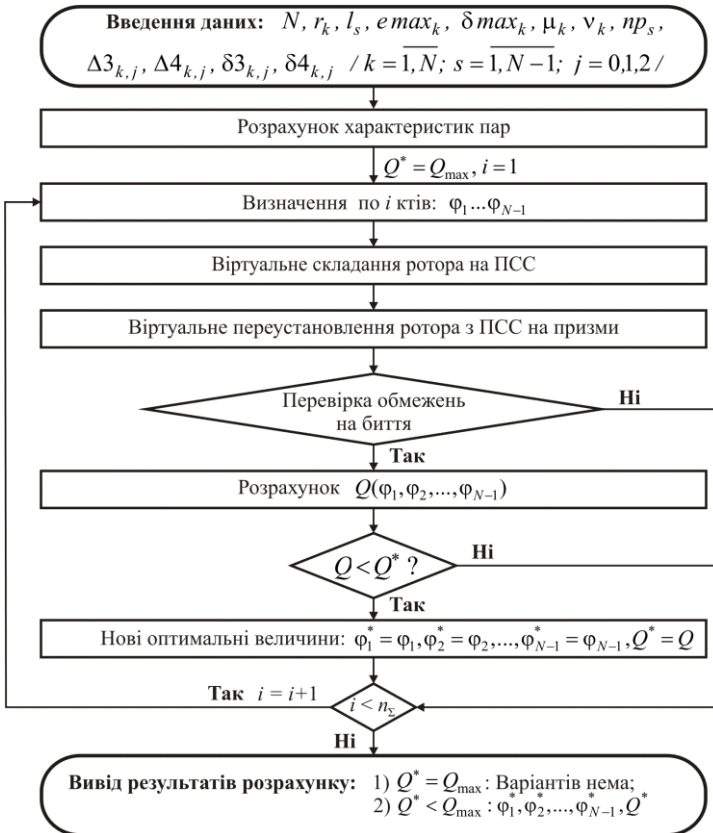


Рис. 3.
Укрупнена блок-схема алгоритму оптимального складання ротора

У п. 3.5 на алгоритмічній мові програмування Pascal написані підпрограми, що реалізують відповідні алгоритми п. 3.4. Вони об'єднані в окремому модулі Unit_Rotor. Для математичних операцій з комплексними числами написані підпрограми і об'єднані в модулі Unit_CMLX.

У п. 3.6 створено інтерфейс користувача в середовищі швидкої розробки програм Borland Delphi. Він дозволяє вводити з клавіатури чи з файлу: інформацію про ротор; точність вимірювальних приладів; пристосування де

будуть заміряться биття КП (ПСС чи призми); інформацію про роторний комплект. Програма дозволяє виконувати розрахунок разового та оптимального складання ротора методом двох пробних складань з заміром биття як на ПСС, так і на призмах.

Розділ 4 "Комп'ютерне моделювання типових процесів складання роторів БДТ".

У п. 4.1. в САПР SolidWorks створена 3D модель ротора БДТ. Змодельовані типові деталі (рис. 4): верхній, нижній вали та робоче колесо. Враховані контрольні та посадочні поверхні, геометричні розміри деталей, необхідні для визначення характеристик пар. Змодельована розмітка ланок, та отвори під болти.

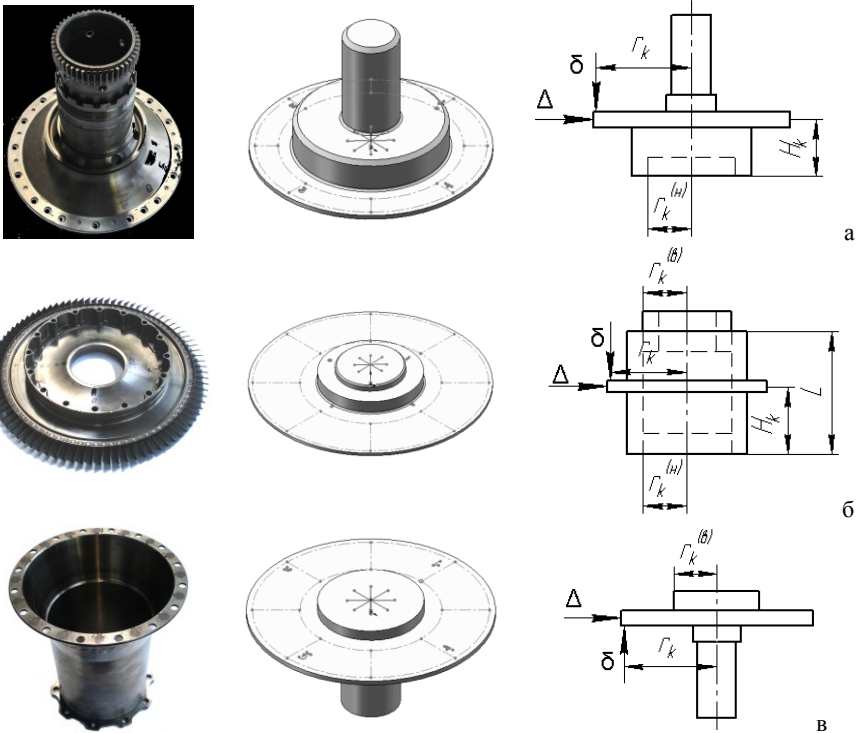


Рис. 4. 3D моделювання типових деталей ротора БДТ

Розроблені 3D моделі ПСС та призми з індикаторними стійками та площинами, що моделюють індикатори биття. Інструментами вимірювань САПР SolidWorks змодельовані переходи та прийоми підведення і встановлення ніжки індикатора та заміру биття КП ланок ротора на ПСС чи на призмах.

У п. 4.2 проведена апробація типових процесів, перевірені алгоритми розрахунку та програма. Для цього розроблені спеціальні тестові задачі на 3D

моделях роторів, що складаються з 3-х, 4-х та 5-и ланок.

При апробації типових процесів перевірялися дії робітників при виконанні операцій, зображених на рис. 1, відтворювалися переходи операції визначення характеристик пар (рис. 1, а) та операції оптимального складання ротора (рис. 1, б).

Робота та функціональність програми, правильність розрахунків перевірялися за допомогою розроблених тестів. Таким чином було відлагоджено роботу інтерфейсу (п. 3.6), перевірені підпрограми (п. 3.5) та алгоритми розрахунків (п. 3.4).

У п. 4.3 повнофакторним 3D експериментом досліджується вплив неточності встановлення ніжки індикатора при замірі биття КП ланок ротора, на похибку в розрахунках оптимальних кутів. Визначається комбінації факторів, при яких виникає найбільша похибка. Розробляються рекомендації щодо зменшення впливу цих факторів на зазначену похибку.

В якості моделі досліджень обрана 3D модель ротора, що моделює процеси встановлення наступної ланки на попередню чи складання двохланкового ротора на ПСС. Експеримент проведено для двох випадків, коли:

- 1) існує лише один кут, що дозволяється призонними болтами, при якому биття КП ланок ротора відповідають заданим обмеженням;
- 2) існує декілька кутів, що дозволяються призонними болтами, при яких биття КП ланок ротора відповідають заданим обмеженням.

Виділені 20 керуючих параметрів (факторів), що характеризують такі неточності встановленні ніжки індикатора (рис. 5):

- по вертикалі (вище чи нижче від серединної лінії КП) при першому (x_1) та другому (x_3) пробних складаннях;
- по радіусу (ближче чи далі від осі обертання відносно центральної лінії на КП) при першому (x_2) та другому (x_4) пробних складаннях;
- по горизонталі (лівіше чи правіше від i -ї мітки на КП ланки) при першому ($y_i, /i = \overline{1,4}/$) та другому ($u_i, /i = \overline{1,4}/$) пробних складаннях (кожній i -й мітці відповідає i -й фактор групи факторів y чи u);
- по горизонталі (лівіше чи правіше від i -ї мітки на КП ланки) при першому ($z_i, /i = \overline{1,4}/$) та другому ($v_i, /i = \overline{1,4}/$) пробних складаннях.

Межі зміни керуючих параметрів (факторів) складають ± 6 мм, або $\pm 6^\circ$ (в залежності від групи факторів що досліджувалась). Відповідно до теорії повнофакторного експерименту введені безрозмірні змінні, що змінюються у межах ± 1 : $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, \bar{u}_i, \bar{v}_i \in \{-1, 1\}$.

Під абсолютною похибкою розрахунку кута розуміється

$$\eta = \varphi - \varphi_{on}, \quad (8)$$

де: φ – оптимальний кут повороту ланки 2 відносно ланки 1, розрахований при неточному встановленні ніжки індикатора; φ_{on} – дійсний оптимальний кут повороту ланки 2 відносно ланки 1, розрахований при точному

встановленні ніжки індикатора.

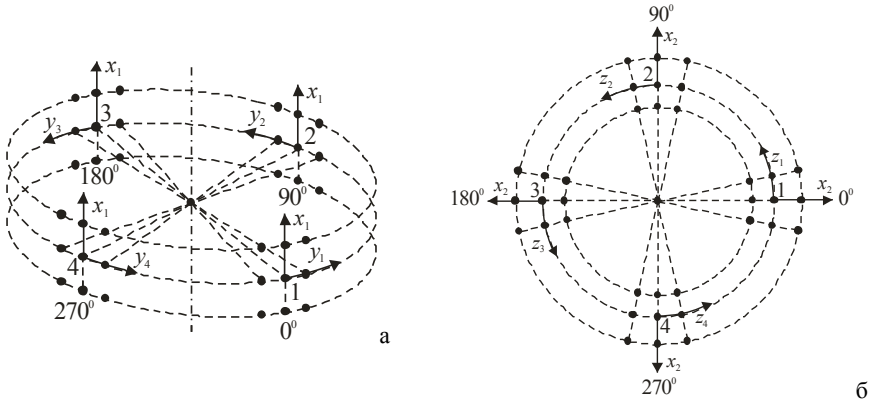


Рис. 5. Неточність встановлення ніжки індикатора при вимірюванні биття:
а – радіального теорія, б – торцевого

Знаходилась функція відгуку у лінійному вигляді (поліному першого степеня). В безрозмірному вигляді функція регресії має вигляд:

$$\eta = \sum_{i=1}^4 (\bar{a}_i \bar{x}_i + \bar{b}_i \bar{y}_i + \bar{c}_i \bar{z}_i + \bar{d}_i \bar{u}_i + \bar{e}_i \bar{v}_i), \quad (9)$$

де $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i, \bar{d}_i, \bar{e}_i, /i=1,4/$ – безрозмірні параметри, що є величинами першого порядку малості щодо безрозмірної 1.

Для знаходження 20 коефіцієнтів рівняння регресії (9) необхідно провести 2^{20} експериментів, де 2 – кількість рівнів значень параметрів фактора (1 чи -1), 20 – кількість факторів, що приймаються до уваги. Оскільки вирішити таку задачу неможливо, кожна група факторів досліджувалася окремо:

$$\eta = \sum_{i=1}^4 \bar{a}_i \bar{x}_i, \quad \eta = \sum_{i=1}^4 \bar{b}_i \bar{y}_i, \quad \eta = \sum_{i=1}^4 \bar{c}_i \bar{z}_i, \quad \eta = \sum_{i=1}^4 \bar{d}_i \bar{u}_i, \quad \eta = \sum_{i=1}^4 \bar{e}_i \bar{v}_i, \quad /i=1,4/, \quad (10)$$

причому, якщо $\bar{x}_i \neq 0$ то $\bar{y}_i = 0, \bar{z}_i = 0, \bar{u}_i = 0, \bar{v}_i = 0, /i=1,4/$.

Для визначення 4-х коефіцієнтів кожної групи факторів, проводилися $2^4 = 16$ експериментів.

В САПР SolidWorks створена наступна 3D модель ротора: кількість ланок $N_z = 2$; радіус, на якому заміряються торцеві биття КП $R_z = 75$ мм; висота, на якій заміряються радіальні биття КП $L_p = 22$ мм; крок повороту ланки $(k+1)$ відносно ланки k рівний $11,25^\circ$ ($N_p = 32$ – призонних болта); точність визначення кута повороту $0,1^\circ$; точність заміру биття: $0,01$ мм.

3D моделюванням проведені експерименти, результати занесені до табл. 2. Знайдені 20 коефіцієнтів функції регресії. Визначені комбінації факторів, при яких модуль абсолютної похибки визначення оптимального кута найбільший.

Табл. 2. Оцінка найбільшої похибки

№ випадку (п.4.3)	1	2	
Значення коефіцієнтів рівняння регресії	\bar{a}_i	0,319; 4,519; -0,41; -4,48	-0,2; -3,75; 0,312; 3,675
	\bar{b}_i	0,0188; -0,056; -0,019; 0,0312	0,025; -0,063; -0,013; 0,0125
	\bar{c}_i	1,144; -0,73; 1,144; -0,73	-0,12; 0,031; -0,031; 0,031
	\bar{d}_i	0,056; -0,04; -0,06; 0,044	-0,06; 0,219; -0,06; -0,22
	\bar{e}_i	0,456; -0,87; 0,456; -0,87	0,256; -0,19; 0,256; -0,19
Значення факторів при якій похибка найбільша	x_i	--++	+ + - -
	y_i	- + + -	- + + -
	z_i	- + - +	+ - + -
	u_i	- + + -	+ - + +
	v_i	- + - +	- + - +
$\varphi_{оп}, град$	277,2	235,1	
$\varphi, град$	268,3	225,9	
$ \eta , град$	8,9 ⁰	9,2 ⁰	

Подальший регресійний аналіз проводився за допомогою програми STATISTICA_6. Для визначення статистичної значущості коефіцієнтів регресії знайдено табличне значення t -критерію Стюдента. $t_T = t_{\alpha/2}(k)$, яке визначається з відповідної таблиці за заданим рівнем значущості $\alpha = 0,05$ і кількістю степенів свободи $k = 7$: $t_T = 0,5432$. Порівняно значення t_T з модулем фактичного значення t -критерію - $t_p = t_p(7)$ для кожного з факторів. Встановлено, що статистично значущими є усі коефіцієнти регресії. Тому всі неточності встановлення ніжки індикатора впливають на похибку визначення оптимальних кутів поворотів ланок.

Оцінку статистичної надійності отриманого рівняння лінійної регресії проведено за допомогою F -критерію (критерію Фішера), який перевіряє нульову гіпотезу про статистичну незначущість факторів побудованого регресійного рівняння. Фактичне значення F -критерію Фішера рівне $F_p = 2,917$. Табличне значення F -критерію $F_T = F_{\alpha/2}(k_1, k_2) = 1,598$ визначено з відповідної таблиці за заданим рівнем значущості ($\alpha = 0,05$) і числами степенів свободи. Так як $F_p > F_T$, то гіпотеза H_0 не приймається.

Встановлено, що найбільша похибка визначення оптимального кута не перевищує $9,2^\circ$. Вона не впливає на результати розрахунку, бо кути визначаються із кроком, не меншим за $11,25^\circ$ (при 32 призонних болтах).

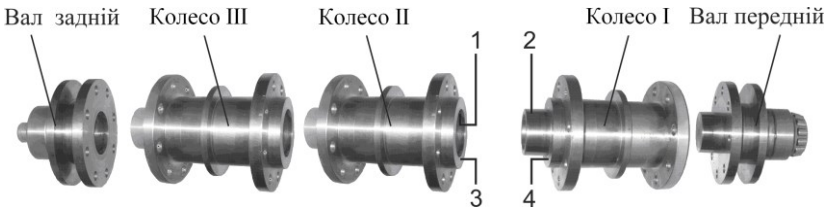
Для зменшення похибок визначення оптимальних кутів рекомендується: використовувати індикаторні стійки; наносити на КП ланок шкали кутів повороту; використовувати ПСС із шкалою повороту з ціною поділки в 1° .

Розділі 5 «Експериментальна апробація складання натурних роторів БДТ методом двох пробних складань».

У п. 5.1 описується натурна модель ротора БДТ та устаткування для апробації типових процесів складання роторів за методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах.

Розроблені та виготовлені деталі (ланки) натурної моделі лінійного ротора БДТ. Модель ротора складається з вала переднього, вала заднього та трьох робочих коліс (рис. 6).

При з'єднанні ланок між собою, радіальна посадочна поверхня 1 ланки k (рис. 6) з натягом охоплює радіальну посадочну поверхню 2 ланки $k+1$ і з силовим замиканням – затяжкою болтів, ланки стискаються до повного контакту торцевими посадочними поверхнями 3 та 4.



**Рис. 6. Деталі, посадочні поверхні ланок ротора:
1, 2 – радіальні; 3, 4 – торцеві**

Ланки мають по вісім монтажних отворів з кроком по 45° для призонних болтів. Посадочні поверхні ланок однакові. Диски в роторі можна міняти місцями. Це дозволяє складати різні варіанти роторних комплектів (табл. 3).

Табл. 3. Роторні комплекти 3-х, 4-х та 5-и ланкового ротора

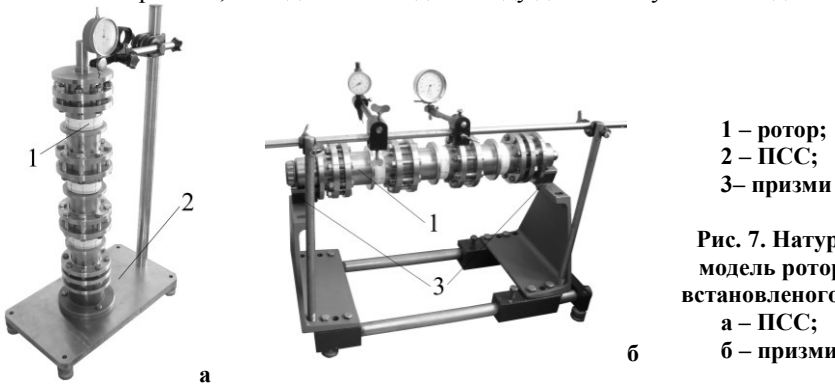
Ротор БДТ	3-х ланковий	4-х ланковий	5-и ланковий
Схематичне зображення ротора і роторних комплектів			
Кількість роторних комплектів	3	6	6
Кількість варіантів складань ротора	$8 \cdot 8 = 64$	$8 \cdot 8 \cdot 8 = 512$	$8 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 8 = 4096$

Описуються конструкції створених: ПСС (рис. 7, а) призм (рис. 7, б). Пристосування призначені для експериментального визначення досягнутих (фактичних) положень ланок частково чи повністю складеного консольного ротора, шляхом заміру радіального і торцевого биття КП.

У п. 5.2 проведена апробація типових процесів складання роторів за методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах з використанням натурної моделі лінійного ротора БДТ. Відтворювались дії робітника при виконанні відповідних технологічних переходів. Послідовність відповідає апробації типових процесів описаних в п. 4.2.

У п. 5.3 експериментально, за допомогою натурної моделі ротора БДТ,

визначена ефективність методу двох пробних складань з заміром биття КП на ПСС та на призмах, по відношенню до методу довільної установки дисків.



Функціонал якості (3) розраховувався для оптимального та першого пробного складань, так як перше пробне складання ротора відповідає методу довільної установки дисків. Ефективність вимірюється у разях і розраховується за формулою:

$$n_{\text{еф}} = Q_{\text{дов}} / Q_{\text{2пс}}, \quad (12)$$

де $Q_{\text{дов}}$ – функціонал якості ротора складеного за методом довільної установки дисків, а $Q_{\text{2пс}}$ – за методом двох пробних складань.

В результаті досліджень встановлено, що (рис. 8):

- биття КП консольного ротора складеного за методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС до 15 разів менші, ніж у ротора складеного за методом довільного встановлення дисків, а биття КП міжпорного ротора складеного за методом двох пробних складань з заміром биття на призмах – до 8 разів менші;
- із збільшенням кількості ланок ротора (з 3-х до 5-и) зростає ефективність метода двох пробних складань у порівнянні із методом довільного встановлення дисків.

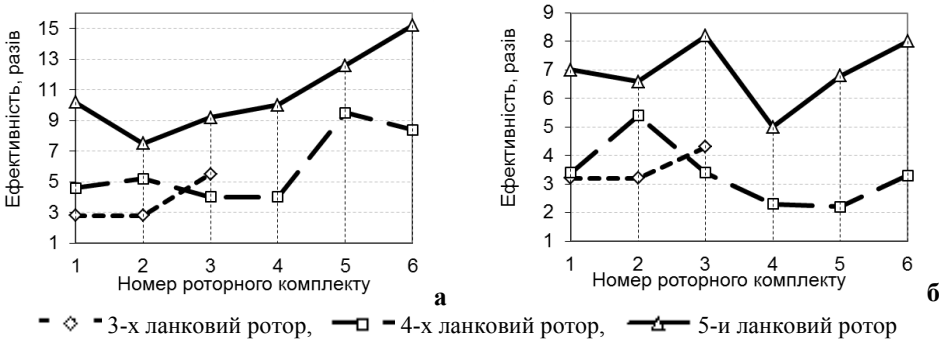


Рис. 8. Графіки ефективності методу двох пробних складань ротора БДТ:
а – консольного; б – міжпорного

У п. 5.4 експериментально, за допомогою натурної моделі ротора БДТ, порівнювались між собою ефективності складання роторів БДТ методами двох пробних складань із заміром биття на ПСС та призмах. Для цього консольний ротор спочатку складається методом двох пробних складань із заміром биття на ПСС і за биттям його КП обчислюється функціонал якості $Q_{K-ПСС}$. Потім цей же ротор складається із заміром биття на призмах, але його биття замірюються на ПСС і за ними розраховується функціонал якості $Q_{K-ПР}$. Ефективність одного метода у порівнянні з іншим вимірюється у разях і розраховується за формулою $n_K = Q_{K-ПР} / Q_{K-ПСС}$. Аналогічно порівнюються ефективності двох методів при складанні міжпорних роторів: $n_M = Q_{M-ПСС} / Q_{M-ПР}$, де $Q_{M-ПСС}$ – функціонал якості міжпорного ротора, складеного із заміром биття на ПСС, а $Q_{M-ПР}$ – на призмах.

На рис. 9 приведено графіки порівняння ефективностей для 6-ї роторних комплектів, складених з 4-х і 5-ї ланок.

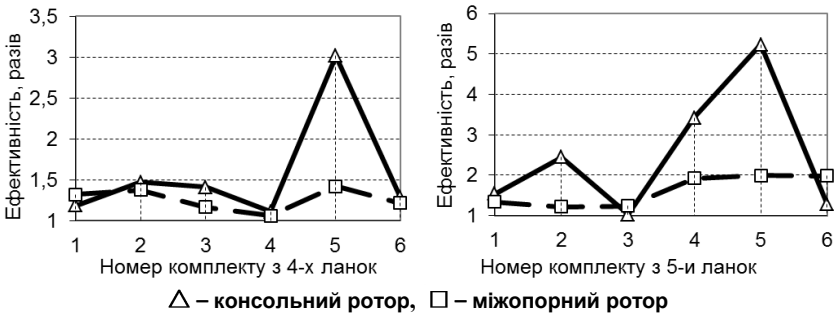


Рис. 9. Порівняння ефективностей складання консольних і міжпорних роторів БДТ методами двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах

Експерименти виявили наступне:

- при оптимальному складанні роторного комплекту спочатку як консольного ротора, а потім – як міжпорного у 100% випадків набори оптимальних кутів взаємних розворотів ланок ротора різні;
- у консольного ротора значення функціоналу якості до 5-ї разів менше при його складенні за методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС, ніж при складенні з заміром биття на призмах;
- у міжпорного ротора значення функціоналу якості до 2-х разів менше при його складенні за методом двох пробних складань з заміром биття на призмах, ніж при складенні з заміром биття на ПСС.

Отже, доцільно складати консольні ротори за методом двох пробних складань за заміром биття на ПСС, а міжпорні – на призмах.

Розроблена технологія апробована на ДП "Івченко-Прогрес" при складанні роторів авіаційних ГТД Д18-Т, Д-36, АІ-222 та їх модифікацій.

Визначений очікуваний економічний ефект від впровадження технології складає 121 тис. грн. на рік та досягається за рахунок:

- відмови від виготовлення центрувального пристосування для першої ланки ротора (як для консольних, так і міжпорних роторів);
- підвищення якості складання міжпорних роторів (зменшення до 2-х разів розподіленого дисбалансу ротора);
- зменшення часу складання ротора на 5% за рахунок зниження вимог до температурної стабілізації ротора перед заміром биття (як для консольних, так і міжпорних роторів).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язане актуальне наукове завдання в галузі технології машинобудування з технологічного забезпечення якості складання міжпорних роторів БДТ шляхом розробки технології, заснованої на методі двох пробних складань із заміром биття КП ланок ротора на призмах.

1. За результатами літературного огляду встановлено, що найбільш ефективною технологією оптимального складання роторів БДТ є технологія, заснована на методі двох пробних складань. Обґрунтовано, що для підвищення її ефективності при складанні міжпорних роторів треба заміряти биття КП ланок ротора на призмах, а не на ПСС.

2. Вперше розроблений типовий техпроцес складання міжпорних роторів БДТ методом двох пробних складань з заміром биття на призмах, що містить дві операції: з визначення характеристик пар ротора; з оптимального складання ротора. Він не потребує центрувального пристосування для першої ланки і може бути застосований при складанні консольних роторів.

3. Уперше розроблена математична модель цього процесу, що включає: методику визначення характеристик пар при замірі биття ротора на призмах; математичну модель разового віртуального складання ротора; математичну модель прогнозу биття КП ланок ротора; математичні алгоритми розрахунків, зокрема – оптимізації функціонала якості.

4. Розроблені укрупнені та розгорнуті блок-схеми та алгоритми розрахунків, призначені для програмування. В середовищі швидкої розробки програм Borland Delphi створені підпрограми і програма, що забезпечують розрахунками техпроцес складання роторів БДТ методами двох пробних складань із заміром биття на ПСС та на призмах.

5. За допомогою САПР SolidWorks створені 3D моделі типового ротора БДТ, ПСС та призми. Змодельовані основні операції та переходи типових процесів методу двох пробних складань роторів БДТ з заміром биття на ПСС та на призмах. Апробовані типові процеси (операції та переходи) цих методів складання роторів. Перевірені алгоритми розрахунків, та відлагоджена комп'ютерна програма для числових розрахунків.

6. З використанням 3D моделювання 2^n -факторних експериментів встановлено, що похибки розташування ніжки індикатора у межах ± 6 мм по

довжині ротора, чи $\pm 6^\circ$ при обертанні ротора не впливають на величини розрахованих оптимальних кутів поворотів ланок, за умови, що кількість призових болтів, що з'єднують дві ланки у кожній парі, не більша за 32.

7. Експериментально, з використанням натурної моделі типового ротора БДТ, для критерію якості у вигляді суми модулів дисбалансів, встановлено, що:

- значення функціоналу якості ротора, складеного за методами двох пробних складань з заміром биття на ПСС та на призмах до 15 разів менше для консольного та до 8 разів менше – для міжопорного ротора, ніж при його складанні за методом довільного встановлення дисків;

- із збільшенням кількості ланок ротора (з 3-х до 5-и) зростає ефективність метода двох пробних складань у порівнянні із методом довільного встановлення дисків;

- при оптимальному складанні одного і того ж ротора як консольного і як міжопорного одержуються, як правило, різні набори оптимальних кутів і різні значення функціоналу якості;

- у консольного ротора значення функціоналу якості до 5-і разів менше при його складанні методом двох пробних складань з заміром биття на ПСС, ніж при складанні з заміром биття на призмах;

- у міжопорного ротора значення функціоналу якості до 2-х разів менше при складанні ротора методом двох пробних складань з заміром биття на призмах, ніж при складанні з заміром биття на ПСС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Філімоніхін Г.Б. Складання міжопорних роторів барабанно-дискової конструкції методом двох пробних складань з заміром биттів на призмах / Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха // Збірник наукових праць КНТУ, 2009, Вип. 22, С. 206–210.

2. Філімоніхін Г.Б. Стенд для дослідження процесу складання роторів барабанно-дискової конструкції / Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха //Збірник наукових праць КНТУ, 2010, Вип. 23, С. 206–210.

3. Філімоніхін Г.Б. Апробації технології складання роторів ГТД БДТ за методом двох пробних складань із застосуванням 3D моделювання / Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПІ" – 2012. №34, С. 34–41.

4. Невдаха А.Ю. Вплив неточностей заміру биття КП ланок ротора БДТ на похибку розрахунку оптимальних кутів взаємного розвороту ланок / А.Ю. Невдаха // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник “Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин”, 2012. Вип. 42., частина II – С. 213-221.

5. Філімоніхін Г.Б. Сборка роторов барабанно-дискового типа методом двух пробных сборок с замером биений на призмах – типовые процессы и алгоритмы расчетов / Г.Б. Філімоніхін, А.Ю. Невдаха //

Технологические системы. – 2012. – №4 (61). – С. 42-50.

6. Філімоніхін Г.Б. Збирання двоопорних роторів барабанно-дискової конструкції методом двох пробних збирань / Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха // Дев'ятий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2009. С. 203–204.

7. Філімоніхін Г.Б. Технологія складання роторів барабанно-дискового типу методом двох пробних складань із заміром биття на призмах / Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха // Інженерна механіка та транспорт: Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених ЕМТ–2011. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011 С. 50–52.

8. Філімоніхін Г.Б. Використання 3D моделі ротора барабанно-дискового типу для апробації технології складання роторів ГТД методом двох пробних складань / Г.Б.Філімоніхін, А.Ю.Невдаха // Сьома міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2012". Тези доповідей. Чернігів-Жукин. – 2012, С. 152–155.

9. Невдаха А.Ю. Вплив на похибку визначення оптимальних кутів повороту деталей ротора ГТД неточностей заміру биття його контрольних поверхонь / А.Ю.Невдаха // 3-я міжнародна науково-технічна конференція "Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій". Тези доповідей. Національний університет "Львівська політехніка", Львів. – 2012. С. 85.

АНОТАЦІЯ

Невдаха А.Ю. Технологічне забезпечення якості складання міжопорних роторів барабанно-дискового типу методом двох пробних складань. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – Технологія машинобудування. – Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2013.

Розроблена технологія кінцевого, оптимального складання міжопорних роторів барабанно-дискового типу (БДТ), що використовує метод двох пробних складань із заміром биття на призмах. Вона включає типовий технологічний процес, його математичну модель, алгоритми розрахунків оптимальних кутів розворотів ланок ротора в роторному пакеті, комп'ютерну програму для автоматизації розрахунків. Розроблена технологія дозволяє якісно складати міжопорні і консольні ротори БДТ без використання додаткових пристосувань, унікальних для деталей конкретного ротора.

Експериментально з використанням 3D моделювання та 2^н факторного експерименту, встановлено, що похибка встановлення ніжки індикатора ± 6 мм по осі ротора, чи $\pm 6^\circ$ при повороті ротора під час заміру биття КП ланок є статистично значущою, але не впливає на величини розрахованих оптимальних кутів поворотів ланок, за умови, що кількість призонних болтів, що з'єднують дві ланки у кожній парі, не більша за 32.

Експериментально з використанням натурної моделі типового ротора

БДТ встановлено, що оптимальне складання одного і того ж ротора як консольного так і міжопорного забезпечують, як правило, різні набори оптимальних кутів. При цьому у консольного ротора значення функціонала якості до 5-ї разів менше при його складанні з заміром биття на ПСС, ніж на призмах, а у міжопорного – до 2-х раз менше при його складанні із заміром биття на призмах, ніж на ПСС. Тому складання роторів БДТ методом двох пробних складань доцільно проводити для консольних роторів з заміром биття КП ланок на ПСС, а для міжопорних – на призмах.

Ключові слова: *ротор барабанно-дискового типу, складання ротора, типовий процес, поворотний складальний сталець, призми.*

SUMMARY

A. Nevdakha. Technological providing of drum-disk's type rotors quality assembling by method of two sample assemblages. - Manuscript.

Dissertation for the degree of Ph.D., specialty 05.02.08 - Manufacturing engineering. - National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2013.

The technology of the final and optimal assembly between-supporting rotors of the drum-disk type (DDT), which uses the method of two sample assemblages with metering beating on prisms has been created. There are including of typical technological process, its mathematical model, the algorithm of optimum angles rotor's units in a rotary package spreading calculations, a computer program for automation of calculations. Developed technology makes assemble of between-supporting and cantilever rotor DDT qualitatively without any extra jigs, unique for the components of specific rotor.

Experimentally by using of 3D modeling and 2ⁿ factorial experiment has been established that the error of indicator's stalk installation is ± 6 mm along the rotor's axis or $\pm 6^\circ$ while turning the rotor while measuring of control surface (CS) beats it is statistically significant, but provided that number of prism's bolts which connect two links in each pair are no more of 32 - there are have no affect on value of the calculated optimal rotation angles of links.

Experimentally by using of natural typical model of DDT rotor's has been established that the optimal assembly one and the same rotor as the console and between-supporting usually provided different sets of optimal angles. In this case the console rotor has value of quality functional to the 5-th times lower during its compiling with the metering beating on rotate assembling stock (RAS) than on prisms, and the between-supporting – up to 2 times lower during its compiling with the metering beating on prisms than on RAS. Therefore, by methods of two test assemblages is expedient assemble of console DDT rotors with measuring of CS beats on RAS, and for between-supporting rotors – on prisms.

Keywords: *rotor of drum-disk type, assembly of rotor, typical process, turning assembling ship-way, prisms.*

АНОТАЦИЯ

Невдаха А.Ю. Технологическое обеспечение качества сборки межопорных роторов барабанно-дискового типа методом двух пробных сборок. –

Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2013.

Разработана технология конечной, оптимальной сборки межопорных роторов БДТ, использующая метод двух пробных сборок с замером биений на призмах. Она включает типовой технологический процесс, его математическую модель, алгоритмы расчетов оптимальных углов разворота звеньев ротора в роторном пакете, компьютерную программу для автоматизации расчетов. Технология позволяет оптимально собирать межопорные и консольные роторы БДТ без использования дополнительных приспособлений, уникальных для деталей конкретного ротора.

В среде быстрой разработки приложений Borland Delphi создана компьютерная программа, обеспечивающая расчеты при сборке роторов ГТД БДТ методом двух пробных сборок.

В системе автоматического проектирования SolidWorks созданы 3D модели типового ротора ГТД БДТ, ПСС и призм. Смоделированы основные операции и переходы типовых процессов метода двух пробных сборок роторов ГТД БДТ с замером биений на ПСС и на призмах. Апробированы типовые процессы, проверены алгоритмы расчетов и отлажена компьютерная программа для числовых расчетов.

Экспериментально, с использованием 3D моделирования и 2^н факторного эксперимента, установлено, что погрешность установки ножки индикатора ± 6 мм по оси ротора, или $\pm 6^\circ$ при повороте ротора во время измерения биений КП звеньев, является статистически значимой, но не влияет на величины рассчитанных оптимальных углов поворотов звеньев, при условии, что количество болтов, соединяющих два звена в каждой паре, не более 32.

Экспериментально, с использованием натурной модели типового ротора БДТ установлено, что значение функционала качества ротора, собранного методами двух пробных сборок, в 15 раз меньше для консольного и в 8 раз меньше для межопорного ротора, чем при его сборке методом произвольной установки дисков. Установлено, что оптимальную сборку одного и того же ротора как консольного и как межопорного обеспечивают, как правило, разные наборы оптимальных углов. При этом у консольного ротора значение функционала качества до 5-и раз меньше при его сборке с замером биений на ПСС, чем на призмах, а у межопорного – до 2-х раз меньше при его сборке с замером биений на призмах, чем на ПСС. Поэтому сборку роторов БДТ методом двух пробных сборок целесообразно проводить для консольных роторов с замером биений КП звеньев на ПСС, а для межопорных – на призмах.

Ключевые слова: ротор барабанно-дискового типа, сборка ротора, типовой процесс, поворотный сборочный стапель, призмы.

Підп. до друку 14.10.2013. Формат 60х90/16. Папір офс. Надруковано на різнографі.
Ум. друк. арк. 1,4. Обл.-вид. арк. 1,1. Тираж 120 прим.
Зам. № 73.

Виготовлювач Лисенко В.Ф.
25028, м. Кіровоград, вул. Пацаєва, 14, корп.. 1, кв. 101, Тел. (0522) 322-326
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: серія ДК № 3904 від 22.10.2010

