

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Смірнова Ліляна Михайлівна

УДК 539.4: 621.165: 621.928

**ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ РОБОЧИХ КОЛІС
ТУРБОКОМПРЕСОРІВ З УРАХУВАННЯМ
ВИПАДКОВОСТІ РОЗЛАДУ ТА НАВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 05.02.09. - Динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Жовдак Валерій Олексійович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
м. Харків, професор кафедри динаміки та
міцності машин.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, ст.н.с.

Зіньковський Анатолій Павлович,

Інститут проблем міцності

ім. Г.С. Писаренка НАН України,

м. Київ, зав. відділом коливань в роторних

системах;

кандидат технічних наук, ст. н. с.

Ткачук Микола Анатолійович,

Національний технічний університет

"Харківський політехнічний інститут",

м. Харків, в/о зав. каф. теорії механізмів,

машин і роботів.

Провідна установа:

Інститут проблем машинобудування

ім. А.М. Підгорного НАН України,

м. Харків.

Захист відбудеться “ 18 ” червня _____ 2003 р. о 14 год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у
Національному технічному університеті ”Харківський
політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул.
Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного
технічного університету ”Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 15 ” травня _____ 2003 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.10

Бортовой В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тенденцією розвитку сучасного турбо-компресоробудування, яке становить одну з найважливіших галузей промисловості, є зниження енергоспоживання при підвищенні потужності та продуктивності машин. В залежності від призначення машин, їх потужність може змінюватись у широких межах. Для турбокомпресорів малої потужності, які знайшли широке застосування в турбонаддуві двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), що дозволяє збільшити КПД двигунів за рахунок більш повного використання енергії вихлопних газів, характерні підвищені статичне, динамічне і температурне навантаження. Турбокомпресори високої потужності широко застосовуються в нафтопереробній, хімічній промисловості, а також на магістральних газопроводах. Для підвищення конкурентної спроможності газотранспортних мереж України необхідна заміна агрегатів, що перекачують газ (ГПА), на більш сучасні та енергоефективні з поліпшеними технічно-економічними характеристиками, що висуває високі вимоги до оцінки їхньої надійності та екологічності. Відповідно до статистики, більшість відмов турбокомпресорів пов'язана з виникненням втомних тріщин у робочих колесах, які є найбільш навантаженими елементами. Тому, на етапі прогнозування надійності та ресурсу досить важливим є аналіз небезпечних резонансних режимів і рівнів вібронпруженості робочих коліс. Значний вплив на формування спектрів власних частот і резонансних режимів здійснюють малі випадкові відхилення коліс від циклічної симетрії (розлад коліс) та випадковий характер газодинамічного навантаження на лопатки. Аналіз

стану проблеми вказує на відсутність методик прогнозування надійності робочих коліс з урахуванням зазначених випадкових факторів, тому розробка підходів та методик прогнозування надійності та ресурсу робочих коліс турбокомпресорів з урахуванням випадковості розладу та навантаження є актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась за держбюджетними темами на 1997-1999 рр. “Розробка методів теоретичного та експериментального дослідження динаміки, міцності, надійності складних, у тому числі адаптивних механічних систем, які знаходяться в умовах інтенсивного навантаження, що взаємодіють з різними полями та середовищами з урахуванням термо-, магніто-, електропружності деформованих тіл” (№ Д.Р. 0197U001903), та на 2000-2002 рр. “Розробка теоретичних та експериментальних методів дослідження коливань та надійності складних роторних систем з метою збільшення їх ресурсу та зниження енергетичних затрат на виготовлення та експлуатацію” (№ Д.Р. 0100U001651), а також, за договорами на створення науково-технічної продукції між НТУ “ХП” та ВАТ “Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе” на 2001-2003 рр. “Розробка методик і дослідження перспективних вузлів і систем відцентрових компресорів ГПА” (№ Д.Р. 0196U022150), та на 2003 р. “Дослідження міцності робочих коліс турбокомпресорів СПЧ 16/76-1.7”.

Мета і задачі дослідження. *Мета роботи:* розробка нових підходів до прогнозування надійності і ресурсу робочих коліс турбін і компресорів з урахуванням випадкового характеру

навантаження і відхилення коліс від строгої симетрії. Поставлена мета визначає ряд основних *задач*:

- провести аналіз експериментальних даних про джерела відхилень робочих коліс від циклічної симетрії, про характер та величину окружної та часової нерівномірності тиску газу на вході в колесо з виявленням випадкових складових навантаження;

- побудувати стохастичну математичну модель динамічного навантаження коліс на основі полів газодинамічних тисків на лопатки колеса для розрахунку вимушених коливань із урахуванням випадкових складових навантаження;

- розробити на основі методу скінчених елементів (МСЕ) математичні моделі робочих коліс із урахуванням їх циклічної симетрії і можливих випадкових відхилень від симетрії;

- визначити статичний напружено-деформований стан (НДС) при дії відцентрових сил з урахуванням натягу при пресовій посадці колеса на вал;

- провести дослідження впливу розладу на статичний НДС;

- провести чисельні дослідження власних коливань і проаналізувати ступінь розшарування власних частот і спотворення власних форм коливань коліс при внесенні розладу;

- розробити методику вирішення задачі про детерміновані та випадкові вимушені коливання; встановити закономірності формування резонансних режимів при вирішенні задач про вимушені коливання коліс з розладом при випадковому навантаженні;

- розробити методику розрахунку основних показників надійності робочих коліс з розладом при випадковому навантаженні та провести чисельні дослідження впливу розладу на надійність робочих коліс.

Об'єктом дослідження є коливання робочих коліс турбокомпресорів з урахуванням випадковості розладу і навантаження.

Предмет дослідження: детерміновані та імовірнісні характеристики власних і вимушених коливань, характеристики надійності та ресурсу турбінних коліс малорозмірних ТКР для наддуву ДВЗ і робочих коліс відцентрових компресорів (ВК) ГПА з урахуванням випадковості розладу і навантаження.

Методи дослідження: метод скінчених елементів, метод Монте-Карло, метод спектральних представлень, методи теорії випадкових функцій, методи теорії надійності.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено нові математичні моделі робочих коліс, що дозволяє враховувати випадковий характер малих відхилень коліс від циклічної симетрії.

Уперше для коліс ТКР і коліс ВК ГПА розроблені стохастичні математичні моделі зовнішнього навантаження на основі вирішення задач про просторову стаціонарну течію газу в міжлопаточних каналах коліс і аналізу даних про випадкові складові навантаження.

Подальший розвиток одержали підходи до аналізу впливу щільності спектру на ступінь розшарування власних частот і спотворення власних форм при розладі, а також підходи до

аналізу небезпечних резонансних режимів для коліс турбін ТКР із розладом при випадковому навантаженні.

Виявлено закономірності формування спектрів власних частот, нових резонансних режимів, спектральних щільностей максимальних еквівалентних напружень при урахуванні випадкового характеру зовнішнього навантаження і розладу.

Уперше розглянуто підходи до вирішення задачі надійності робочих коліс турбокомпресорів з урахуванням випадковості параметрів і навантаження. Розроблено методику прогнозування надійності і ресурсу робочих коліс на основі аналізу діючих газодинамічних навантажень і відхилень від циклічної симетрії за рахунок технологічних особливостей виготовлення коліс.

Практичне значення одержаних результатів. Основні результати прикладних досліджень у виді методик розрахунків та програмного забезпечення, використані та впроваджені у практику проектування на ВАТ "Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе" (м. Суми), на ЗАТ "Турбо-Веста" (м. Харків), а також у навчальному процесі НТУ "ХП" кафедри динаміки та міцності машин.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, викладені в дисертації, належать авторові. У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать наступні результати: роботи [1-5, 7] - розробка скінченоелементних (СЕ) моделей і проведення чисельних досліджень (власні, вимушені, випадкові коливання, газодинаміка), результати по дослідженню впливу розладу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здравоохранение”, м. Харків, 1999 р. та 2000 р.; “12 межд. научно-техническая конференция по компрессорной технике”, м. Казань, 2001 р.; “Методы и программное обеспечение расчетов на прочность”, м. Геленджик, 2002 р. У повному обсязі робота доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин НТУ “ХПІ”.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 7 друкованих праць у спеціалізованих виданнях, серед яких 4 статті у фахових виданнях ВАК України, 2 статті у збірниках та 1 праця у трудах міжнародної науково-технічної конференції.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та 2 додатків. Повний обсяг дисертації складає 155 сторінок, 29 ілюстрацій на 23 сторінках, 45 ілюстрацій по тексту; 2 таблиці на 2 сторінках, 13 таблиць по тексту; 2 додатки на 2 сторінках; 135 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 115 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, позначені мета та задачі дослідження і викладені основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі на основі літературного огляду показано стан проблеми прогнозування ресурсу робочих коліс

турбокомпресорів з урахуванням випадкових параметрів при випадковому навантаженні. Приведено короткий огляд найбільш характерних особливостей поведінки циклічно симетричних систем із розладом при власних і вимушених коливаннях, які було виявлено раніше при дослідженні спрощених і складних СЕ-моделей робочих коліс турбокомпресорів.

У розділі також приводиться опис об'єктів дослідження (рис.1), їх основних геометричних параметрів, характеристик матеріалів, умов роботи і статистики відмов. Показано особливості моделювання робочих коліс на основі МСЕ (рис.2) і представлено аналіз основних параметрів, які характеризують розлад коліс. Експериментальні дані про джерела можливих випадкових відхилень робочих коліс від циклічної симетрії показують, що в малорозмірних колесах турбін ТКР внаслідок складності багатоетапного процесу лиття спостерігаються істотні розходження в геометрії лопаток, з яких найхарактернішим є різнотовщинність лопаток. Технологія з'єднання покривного диску з лопатками коліс ВК ГПА здійснюється за допомогою високотемпературної пайки, що призводить до появи зсуву покривного диску по відношенню до осі колеса. При цьому, величина ексцентриситету може досягати декількох міліметрів. Після остаточної дообробки та зрівноважування покривний диск виявляється різнотовщинним по окружності. На основі цих даних розроблені та представлені СЕ-моделі робочих коліс з розладом.

У **другому розділі** представлені результати вирішення на основі МСЕ статичних задач методом Гауса і задач власних коливань методом Ланцоша для коліс із розладом. При

дослідженні статичного НДС колеса ВК враховувалось напруження на ступиці від натягу при пресовій посадці колеса на вал. Проведено аналіз спектрів власних частот відкритих малорозмірних турбінних коліс ТКР для наддуву ДВЗ і закритих коліс ВК ГПА з розладом. Показано різний ступінь розшарування власних частот і спотворення власних форм коліс закритого і відкритого типу, що зумовлено різною щільністю спектрів власних частот коліс. У колесах ВК, в яких спектр власних частот є розрідженим, чутливість власних форм до розладу менш значна, ніж для коліс ТКР, спектр яких є щільним і форми помітно спотворюються при внесенні малого розладу.

У третьому розділі розроблена модель газодинамічного навантаження коліс турбін ТКР і коліс ВК ГПА. Джерелом вібраційних збурювань при обертанні колеса є змінні аеродинамічні сили, що діють на лопатки і породжуються окружною нерівномірністю параметрів газу (тиску, температури, швидкості) перед колесом. Поле тисків на k -у лопатку колеса має вигляд:

$$P(s, k, t) = F(s) \cdot P(\varphi_k, t), \quad \{s\} = \{x, y, z\}^T; \quad \varphi_k = 2\pi k/N, \quad (1)$$

де $F(s)$ - стаціонарне просторове поле тисків; $\{s\}$ - вектор координат точки лопатки колеса; N - кількість лопаток. В запропонованій моделі навантаження характер розподілу тисків $F(s)$ передбачається незмінним і поля тисків на спинку та коритце лопатки визначаються із вирішення задачі про стаціонарну течію в'язкого газу у міжлопаточному каналі колеса. У V-образному дизельному двигуні роздільне підведення газів від двох груп циліндрів двигуна до колеса турбіни ТКР по різним колекторам є основною причиною імпульсності потоку перед

турбіною та окружної нерівномірності тисків на лопатки. При розкладанні функції тисків на лопатки колеса турбіни ТКР у ряд Фур'є по координаті часу, вона має вид дискретного набору гармонік:

$$P(s, k, t) = F(s) \cdot \sum_m \sum_j [A_{mj}(\varphi_k) \cdot e^{i(m\omega + j\Omega)t} + B_{mj}(\varphi_k) e^{i(m\omega - j\Omega)t}], \quad (2)$$

де Ω - швидкість обертання колінчатого валу двигуна, ω - швидкість обертання колеса турбіни. Для колеса компресора ГПА поле тисків має вигляд:

$$P(s, k, t) = F(s) \cdot \sum_m P_m \sin \varphi_k e^{im\omega t}. \quad (3)$$

Представлені результати газодинамічних розрахунків (рис.4) просторової стаціонарної течії в'язкого газу в турбіні ТКР для наддуву ДВЗ та в колесі ВК (рис.3). Розрахунки течії газу в міжлопаточних каналах проводилися за допомогою програми ANSYS/Flotran на основі рівнянь Нав'є-Стокса, що осереднені за Рейнольдсом з використанням $k - \varepsilon$ моделі турбулентності.

У четвертому розділі представлено вирішення задачі про вимушені коливання коліс із розладом під дією навантажень, які викликані окружною нерівномірністю газу. Показано, що різний ступінь спотворення власних форм при розладі коліс відкритого і закритого типу веде до різного рівню зросту резонансних напружень системи з розладом по відношенню до симетричної системи (перевантаження). Дослідження особливостей формування резонансних режимів колеса ТКР із розладом показує, що їх амплітуди менші за максимальні (рис.5). Однак, якщо врахувати той факт, що при виконанні різних видів сільськогосподарських робіт частота обертання колінчатого валу

тракторного дизеля змінюється випадково в діапазоні, який відповідає регуляторній гілці характеристики дизельного двигуна:

$$\Omega_M \leq \Omega \leq \Omega_H, \quad (4)$$

то виявляється, що велику частину часу ТКР працює на частотах обертання, які попадають у зону появи нових резонансних режимів внаслідок розладу. З результатів статистичної обробки осцилограм зміни кутової швидкості колінчатого валу дизельного двигуна, які приведені в літературі, виходить, що узагальнені щільності розподілу кутової швидкості і швидкості її зміни досить точно апроксимуються нормальним законом розподілу.

При моделюванні навантаження колеса турбіни ТКР з урахуванням випадкового варіювання частоти обертання колінчатого валу функція тисків (2) має вигляд:

$$P(s, k, t) = F(s) \cdot \sum_m P_m; \quad P_m = \sum_j \left[A_{mj}(\varphi_k) \cdot e^{i\psi_j^+(t)} + B_{mj}(\varphi_k) e^{i\psi_j^-(t)} \right]; \quad (5)$$

$$\psi_j^\pm(t) = k_{mj}^\pm \cdot (\Omega_0 t + \xi(t) + \varphi(t)); \quad k_{mj}^\pm = m \frac{\omega}{\Omega} \pm j; \quad \xi(t) = \int_0^t s(t) dt, \quad (6)$$

де Ω_0 - середня частота обертання колінчатого валу. Передбачається, що - стаціонарний гаусовий процес з нульовим математичним очікуванням, який описує випадкові зміни частоти обертання колінчатого валу дизельного двигуна. В роботі одержана спектральна щільність процесу (5), яка має вигляд (рис.6):

$$S_{P_m}(\Omega) = \sum_j \left(S_j^+(\Omega) + S_j^-(\Omega) \right); \quad (7)$$

$$S_j^\pm(\Omega) = c_{mj}^2 e^{(k_{mj}^\pm)^2 \beta^2} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{(-1)^z (k_{mj}^\pm)^{2z}}{z!} \cdot \left[\frac{A^\pm}{(A^\pm)^2 + (k_{mj}^\pm)^2 (\Omega - \Omega_0)^2} + \frac{A^\pm}{(A^\pm)^2 + (k_{mj}^\pm)^2 (\Omega + \Omega_0)^2} \right],$$

де для $S_j^+(\Omega)$ $c_{mj} = A_{mj}$ і для $S_j^-(\Omega)$ $c_{mj} = B_{mj}$; α - коефіцієнт загасання кореляційної функції випадкового процесу. Аналіз вимушених коливань колеса турбіни ТКР при випадковому навантаженні проводився в СЕ-постановці методом спектральних представлень. Розрахунки випадкових коливань показують, що спектри напружень для симетричної системи і системи з розладом при різних декрементах коливань δ є суперпозицію вузькосмугових випадкових процесів з основними частотами, близькими до частот випадкового впливу. Показано значний вплив розладу на резонансні амплітуди напруження у колесі турбіни (рис.7).

У п'ятому розділі розглядається методика розрахунку надійності турбінних коліс ТКР для наддуву ДВЗ. Компоненти тензору напружень мають вигляд суперпозиції випадкових процесів.

Еквівалентними напруженнями, які описують простий напружений стан, є інтенсивності. Параметри щільності розподілу еквівалентного за пошкождувальною дією вузькосмугового випадкового процесу - $f(\sigma_E(t))$ визначаються на основі методу повних циклів:

$$\sigma_{\sigma_E}^2 = \sum_{j=1}^m \sigma_j^2; \quad \sigma_{\dot{\sigma}_E}^2 = \sum_{j=1}^m \omega_j^2 \sigma_j^2; \quad \omega_E = \frac{\sigma_{\sigma_E}^2}{\sigma_{\dot{\sigma}_E}^2}, \quad (8)$$

де $\sigma_{\sigma_E}^2$ - дисперсія, $\sigma_{\dot{\sigma}_E}^2$ - дисперсія швидкості та ω_E - ефективна частота еквівалентного процесу σ_E .

Процес нагромадження ушкоджень при багатоцикловій втомленості в даній роботі описується кінетичним рівнянням:

$$\frac{dz}{dt} = C \cdot (\sigma_E^a)^m; \quad C = \frac{\omega_E}{2\pi N_0 \sigma_{-1}^m}, \quad (9)$$

де N_0 , σ_{-1} , m - параметри кривої втомленості, σ_E^a - амплітуда еквівалентного процесу σ_E . Щільність розподілу пошкоджуваності $f(z)$ передбачається нормальною з математичним очікуванням і дисперсією у вигляді:

$$m_z = K_1 t; \quad K_1 = M \left[C \cdot (\sigma_E^a)^m \right] = C \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} (\sigma_E^a)^m f(\sigma_E^a) d\sigma; \quad (10)$$

$$\sigma_z^2 = K_2 t; \quad K_2 = 2C^2 \int_0^{\infty} \left(\int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma_1^m \sigma_2^m f(\sigma_1, \sigma_2) d\sigma_1 d\sigma_2 \right) d\tau - K_1^2. \quad (11)$$

За основні показники надійності обрано середній час до руйнування T (або ресурс) та імовірність безвідмовної роботи $P(t)$, які визначаються співвідношеннями:

$$P(t) = P[z(t) \leq z^*] = \int_0^{z^*} f(z, t) dz; \quad T = 1/K_1. \quad (12)$$

Результати розрахунків основних показників надійності показують значний вплив розладу на характер щільностей розподілу пошкоджуваності (рис.8), а також на імовірність безвідмовної роботи для різних декрементів коливань (рис.9).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблені нові підходи до вирішення задачі прогнозування надійності і ресурсу робочих коліс турбокомпресорів з урахуванням випадковості розладу і навантаження. На основі розроблених підходів проаналізовано вплив випадкового навантаження і розладу на динамічні процеси і процеси нагромадження ушкоджень від втоми. Практичну цінність складають створені математичні моделі, методики розрахунків, програмне забезпечення, проведені на їх основі дослідження.

Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи:

1. Незважаючи на широке поширення робочих коліс відцентрового типу в машинобудуванні, аналіз літературних даних показав відсутність методик, що дозволяють врахувати вплив випадковості навантаження і розладу на коливання та надійність робочих коліс.

2. Для вирішення задачі використовувався найбільш ефективний та універсальний метод скінчених елементів, який, у сполученні з методами статистичного моделювання і спектральних представлень, дозволив для систем великої розмірності вирішити задачі газодинаміки, теорії коливань і надійності з урахуванням складної геометрії робочих коліс та випадкового просторового характеру навантаження. При прогнозуванні надійності використовувалися методи теорії випадкових функцій і теорії надійності, що дозволяють на основі єдиного методологічного підходу вирішувати задачі коливань і надійності з урахуванням ефектів, які досліджуються.

3. Проведено аналіз експериментальних даних і джерел можливих відхилень робочих коліс від циклічної симетрії, а також розробка просторових СЕ-моделей коліс дозволили більш адекватно описати статичне і динамічне поведіння систем з розладом.

4. Уперше побудована математична модель випадкового поля зовнішніх навантажень на основі вирішення газодинамічних задач і спектрального аналізу тисків перед колесом турбіни ТКР із виділенням випадкових складових.

5. На основі розроблених математичних моделей об'єктів, які досліджуються, і зовнішніх навантажень одержані нові кількісні і якісні результати при вирішенні задач власних, вимушених коливань і надійності в детермінованій та випадковій постановках.

6. Показано різний ступінь впливу розладу на спотворення власних форм і перевантаження коліс у залежності від щільності спектра власних частот для коліс відкритого і закритого типу.

7. Вперше одержані спектри максимальних напружень як результат формування резонансних режимів, які зумовлені випадковим впливом і розладом коліс турбін ТКР.

8. Дослідження особливостей формування щільностей імовірності пошкоджуваності при розладі і випадковому навантаженні показало значний вплив розладу на надійність робочих коліс турбін ТКР, середній ресурс може знижуватися на порядок внаслідок розладу.

9. Достовірність одержаних результатів підтверджена зіставленням з результатами відомими в літературі, а також, з

результатами натурних іспитів ротора ГПА на заводських стендах ВАТ "Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе".

10. Одержані в роботі результати використовувалися при виконанні держбюджетних тем НТУ "ХПИ", були впроваджені шляхом передачі теоретичних розробок, числових даних і застосовуються в практиці проектування турбокомпресорів на ВАТ "Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе" (м. Суми) і на ЗАТ "Турбо-Веста" (м. Харків), що підтверджується актами про впровадження. Розроблені методики прогнозування надійності можна рекомендувати до застосування в конструкторських бюро підприємств, що займаються проектуванням турбокомпресорів.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жовдак В. А., Смирнова Л. М. Собственные колебания циклически симметричных систем со случайной расстройкой //Динамика и прочность машин.- Харьков: ХГПУ.- 1998.-№ 56.-С.95-101.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні чисельних досліджень впливу випадкового розладу на статистичні характеристики розшарування кратних власних частот та спотворення власних форм коливань циклічно симетричних систем.

2. В.А. Жовдак, В.В. Левашов, Л.М. Смирнова Влияния натяга на напряженно-деформированное состояние вращающегося колеса турбокомпрессора //Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".- Харьков: НТУ "ХПИ".- 2001.-№ 6.- С.76-80.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні досліджень впливу натягу від пресової посадки колеса центробіжного компресора на вал на статичний напружено-деформований стан.

3. В.А. Жовдак, Л.М. Смирнова Статический анализ и собственные колебания рабочего колеса турбокомпрессора с учетом технологических погрешностей //Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”.- Харьков: НТУ “ХПИ”.- 2001.-№ 25.- С.81-85.

Здобувачем особисто проведено чисельні дослідження впливу розладу колеса центробіжного компресора на статичний напружено-деформований стан та власні коливання.

4. В.А. Жовдак, В.В. Левашов, Л.М. Смирнова Анализ напряженно-деформированного состояния рабочих колес турбокомпрессоров с учетом технологической расстройки //Вибрации в технике и технологиях.- 2001.- № 4(20).-С.102-106.

Здобувачем особисто проведено чисельні дослідження течії газу у міжлопаточному каналі колеса центробіжного компресора, а також впливу розладу колеса на зростання амплітуд вимушених коливань.

5. В. А. Жовдак, Л. М. Смирнова, В. А. Солошенко Задача статистической динамики для циклически симметричных систем со случайной расстройкой //Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сборник научных трудов ХГПУ.- Харьков: ХГПУ.- 1999.- № 7.- часть 1.- С.280-283.

Здобувачем розроблено методику вирішення задачі статистичної динаміки для власних частот циклично симетричних систем з випадковим розладом.

6. Л.М. Смирнова Статико-динамический анализ рабочего колеса газоперекачивающего центробежного компрессора //Вісник інженерної академії. Спеціальний випуск.- Київ: Інженерна академія України.- 2000.-С. 443-446.

7. В.А. Жовдак, Л.М. Смирнова, В.А. Левашов, В.М. Лукьяненко Особенности статического и динамического анализа рабочих колес турбокомпрессоров с учетом их циклической симметрии //Тезисы докладов “12 межд. научно-техническая конференция по компрессорной технике”.- Казань: КГТУ.-2001.-С.153-154.

Особистий внесок автора полягає у проведенні чисельних досліджень вимушених коливань робочого колеса турбокомпресора при різних умовах навантаження.

АНОТАЦІЇ

Смірнова Л. М. Прогнозування ресурсу робочих коліс турбокомпресорів з урахуванням випадковості розладу та навантаження. - *Рукопис*.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці методики прогнозування надійності робочих коліс турбокомпресорів з урахуванням випадкового характеру навантаження і випадкового відхилення коліс від циклічної симетрії. Основні об'єкти дослідження – колеса відцентрових компресорів ГПА та турбінні колеса малорозмірних турбокомпресорів для наддуву ДВЗ. У роботі проведено розрахунки статичного напружено-деформованого

стану коліс із урахуванням розладу при дії відцентрових сил. У результаті досліджень власних і вимушених коливань показано різну міру впливу розладу на спотворення власних форм коливань та зріст резонансних амплітуд напружень. Виконані газодинамічні розрахунки тривимірної стаціонарної течії газу у міжлопаточному каналі колеса відцентрового компресора ГПА СПЧ 16/76-1.7 та колеса турбіни ТКР-8.5ТВ для наддуву ДВЗ. На основі методу спектральних представлень досліджуються випадкові коливання колеса турбіни ТКР-8.5ТВ при детермінованому та випадковому розладі. Також проведені дослідження впливу розладу на основні показники надійності колеса турбіни ТКР-8.5ТВ.

Ключові слова: компресор, турбіна, циклічно симетрична система, розлад, динамічний процес, коливання, випадковий процес, спектральна щільність, надійність, ресурс.

Смирнова Л. М. Прогнозирование ресурса рабочих колес турбокомпрессоров с учетом случайности расстройки и нагружения. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, 2003.

Диссертация посвящена разработке методики прогнозирования надежности рабочих колес турбокомпрессоров с учетом случайного характера нагружения и случайного отклонения колес от циклической симметрии. Основные объекты исследования – колеса центробежных компрессоров ГПА и

колеса турбин малоразмерных ТКР для наддува ДВС. Моделирование объектов выполнялось на основе метода конечных элементов. Проведен анализ реальных технологических отклонений колес от симметрии. Основные погрешности при изготовлении рабочих колес центробежных компрессоров вносятся при дообработке колеса после припаивания покрывного диска к лопаткам. Колеса турбин ТКР изготавливаются методом литья и основные погрешности вносятся в геометрию лопаток. Наиболее существенной характеристикой расстройки колес является разнотолщинность лопаток. На основе этих данных моделировалась расстройка КЭ-моделей колес и проведены расчеты статического НДС от центробежных сил колес. Для более точного описания нагрузки, которой является окружная неравномерность давлений газа на лопатки колес, были выполнены газодинамические расчеты пространственного стационарного течения газа в межлопаточном канале колеса центробежного компрессора ГПА СПЧ 16/76-1.7 и колеса турбины ТКР-8.5ТВ; получены поля давлений газа на спинку и корытце лопаток. В результате исследований собственных и вынужденных колебаний показана различная степень влияния расстройки на искажение собственных форм колебаний и рост резонансных амплитуд напряжений. Существенное влияние расстройки на динамическое поведение колес турбин ТКР при собственных и вынужденных колебаниях обусловлено особенностью спектра собственных частот колеса, нижней части которого соответствует плотный пакет частот. Для колес турбин ТКР проведен анализ диапазонов случайного изменения частоты оборотов колеса (вследствие варьирования

частоты оборотов коленчатого вала двигателя) и на основе метода спектральных представлений проведены исследования случайных колебаний с расстройкой. Получены спектральные плотности эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных точках. На основе характеристик статических, динамических напряжений, выбранного закона накопления повреждений проводятся расчеты основных показателей надежности колеса турбины ТКР-8.5ТВ. Показано влияние расстройки на вероятность безотказной работы и среднее время до разрушения.

Ключевые слова: компрессор, турбина, циклически симметричная система, расстройка, динамический процесс, колебания, случайный процесс, спектральная плотность, надежность, ресурс.

Smirnova L. M. Reliability prediction methods development of working turbocompressor wheels with randomness of mistuning and loading. - Manuscript.

Thesis for candidate's degree be speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machine. – National Technical University. "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2003.

The thesis is dedicated to reliability prediction technique development of turbocompressor rotors with random nature of loading and random deflections from cyclic symmetry. The main objects of study are centrifugal compressor wheels of gascompressor units and turbine wheels of low-sized turbochargers. In this work the analysis of real technological deflections of wheels from a symmetry is realized. The calculations of static stress and strain state from centrifugal forces of wheels with mistuning are carried out. As a result of free and forced

vibration investigations the different degree of mistuning influencing on free vibration modes distortion and growth of stress resonance amplitudes is shown. A gas-dynamic calculations of three-dimensional steady gas flow in a blade channel of the centrifugal compressor wheel of gascompressor unit SPC 16/76-1.7 and turbine wheel of turbocharger TKR-8.5TV are made. On the basis of a spectral representations method the random vibrations of the turbine wheel of turbocharger TKR-8.5TV are investigated at the fixed and random mistuning. And also, investigations of reliability of the turbine wheel of with mistuning are executed.

Keywords: compressor, turbine, cyclic symmetry system, mistuning, dynamic process, vibrations, random process, spectral density, reliability, lifetime.

Автореферат

**ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ РОБОЧИХ КОЛІС
ТУРБОКОМПРЕСОРИВ З УРАХУВАННЯМ
ВИПАДКОВОСТІ РОЗЛАДУ ТА НАВАНТАЖЕННЯ**

Смірнова Ліяна Михайлівна

Відповідальний за випуск: к.т.н. О.І. Трубаєв