

на правах рукопису

Тарелін Андрій Анатолійович

**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ПАКЕТІВ
ТУРБІННИХ ЛОПАТОК З БАНДАЖНИМИ ПОЛКАМИ**

01.02.06. - динаміка, міцність машин, приладів та апаратури

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків-1994



Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі динаміка та міцність машин Харківського державного політехнічного університету.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Петров Євген Павлович

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Вороб'їов Юрій Сергійович;

кандидат технічних наук, доцент

Беломитцев Андрій Костянтинович.

Провідне підприємство - НВО "Турбоатом", Мінмашпром України, (м. Харків)

Захист відбудеться "20" січня 1995 року в 10⁰⁰ год.

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д068.39.06 у Харківському державному політехнічному університеті (310002, м. Харків-2, МСП, вул. Фрунзе, 21).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету .

Автореферат розісланий "15" грудня 1994 года.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Бортовой В.В.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00777252 (U)

Стефаніка
раїни

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність роботи. Швидкі темпи розвитку конструкцій турбін супроводжуються постійним ростом інтенсивності процесів, що виникають в них при загальному підвищенні вимог до їх міцності та надійності. Висока вартість сучасних агрегатів та робот з їх доводки обумовлюють розвиток розрахунково-теоретичних і експериментальних методів досліджень вібраційних характеристик лопаточного апарата на стадії проектування. Незважаючи на інтенсивні дослідження в цьому напрямку, ряд аспектів даної проблеми залишаються не достатньо вивченими. До таких запитань можливо віднести чисельні та експериментальні дослідження коливань пакетів турбінних лопаток, що поєднуються бандажними полками які не фіксуються в зборці між собою та припускають відносне зміщення поверхней бандажних полок під час коливань. В ряді випадків, при цьому, пакет лопаток може виявляти себе як складна, суттєво нелінійна система. Характерні труднощі, що виникають при дослідженні нелінійних коливань таких систем :

- велике число суттєво нелінійних елементів ;
- різноманіття можливих форм нелінійної взаємодії бандажних полок (однобічний контакт, наявність попередніх зазорів чи натягів, прослизання по поверхні контакта та інше).
- необхідність використання складних скінченоелементних моделей лопаток для отримання точних кількісних оцінок динамічних параметрів пакетів лопаток.

Все це змушує межі використання при проектуванні математичних моделей, методів лінійного аналізу коливань пакетів лопаток і методів, що передбачають лінеаризацію нелінійних систем та окреслює актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках Республіканської науково-технічної програми "Матеріалоємкість" (1988-1991 гг.), а також в рамках державної науково-технічної програми "Підвищення надійності, ресурсу та виключення катастрофічних руйнувань транспортних газотурбінних двигунів" (1992-1994 гг.).

Метою роботи є розробка алгоритмів розрахунку, програмного забезпечення та проведення розрахункових та експериментальних досліджень вимушених коливань пакетів лопаток з урахуванням нелінійного характеру взаємодії лопаток через бандажні полки. Це, в свою чергу, обумовлює:

- необхідність використання методів нелінійного аналізу, придатних для систем з великим числом ступенів волі і з великим числом нелінійностей;

- необхідність зниження розрахункової вартості нелінійного аналізу коливань пакету, в разі використання великих скінченоелементних моделей лопаток;
- необхідність розробки схем проведення експериментальних досліджень нелінійних коливань моделей пакетів лопаток;
- розробку прикладного програмного забезпечення для рішення практичних задач.

Наукова новина. В роботі вперше розглянутий комплекс питань, пов'язаних з чисельними та експериментальними дослідженнями коливань пакетів з урахуванням зміни в процесі коливань параметрів зв'язку між лопатками, що містить:

- використання глобально-збіжного квазиньютонівського алгоритму для отримання періодичних режимів нелінійних коливань пакетів лопаток;
- адаптацію ефективних методів редукції ступенів волі складних механічних систем до рішення задачі про вимушені нелінійні коливання пакетів лопаток з бандажними полками;
- розробку схеми експериментального дослідження вимушених нелінійних коливань моделей з суттєво нелійними пружними характеристиками;
- результати досліджень нелінійних коливань систем одномасових моделей лопаток з кусочно-лінійними пружними характеристиками зв'язків для різноманітних параметрів нелінійної характеристики ;
- дослідження можливості використання великих скінченоелементних моделей лопаток для аналізу вимушених коливань пакетів, а також порівняльний аналіз обчислювальних витрат на проведення розрахунків вимушених та властивих коливань пакетів лопаток для всеузлових і редукованих скінченоелементних моделей лопаток;
- експериментальні дослідження основних, суб- і супергармонічних режимів коливань моделі пакету лопаток, а також результати їх порівняння з чисельним експериментом.

Достовірність результатів досліджень оцінюється співставленням результатів тестових розрахунків з приведеними в літературі даними інших авторів і з даними розрахунків по іншим методикам, а також результатами експериментальних досліджень, що підтверджують існування нелінійних режимів коливань моделей пакетів лопаток.

Практична цінність і втілення роботи. Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідницьких робіт кафедри "Динаміка та міцність машин" Харківського державного політехнічного університету. Цінність роботи полягає в апробації алгоритмів розрахунків нелінійних коливань

пакетів лопаток з бандажними полками, проведенні чисельних досліджень і аналізі впливу на вібраційні характеристики пакетів лопаток різноманітних умов зборки лопаток у пакети, які виникають при виготовленні та експлуатації турбомашин.

Частина результатів роботи використовується в практиці розрахунків відділом вібраційної міцності НВО "Турбоатом" (м. Харків) на стадії проектування нових конструкцій робочих колес турбомашин.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи докладались на 2-ій Всесоюзній конференції "Математическое моделирование: нелинейные проблемы и вычислительная математика" (Звенигород, 1990 р.), 13-ій Всесоюзній конференції "Аэроупругость турбомашин" (Севастополь, 1991 р.), 1-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів механіків у Львові (1993 р.), 25-ій Міжнародній науково-технічній нараді з проблем міцності двигунів (Москва, 1994 р.), Міжнародній науково-технічній конференції: "Удосконалення енергетичних і транспортних турбоустановок методами математичного моделювання, обчислювального і фізичного експерименту" (Змійов, 1994 р.). Робота була докладеною на розширеному науковому семінарі кафедри "Динаміка і міцність машин" ХДПУ.

Публікації. 3 теми дисертації опубліковано 9 друкованих робіт.

Обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, закінчення, списку літератури, що містить 96 найменувань та 110 сторінок друкарського тексту, 49 рисунків, 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовується актуальність теми, її наукова новина і практична значимість, сформульовані мета і основні задачі досліджень, дається коротка характеристика дисертаційної роботи, вказується її зв'язок з програмами та планами наукових досліджень.

В першому розділі проводиться огляд підходів, що використовуються в теперішній час для чисельного аналізу коливань пакетів лопаток, зв'язаних бандажними полками. Обговорюються практичні аспекти вибору математичних моделей пакетів лопаток, що враховують нелінійний характер взаємодії лопаток через міжлопаточні зв'язки. Проводиться систематичний аналіз методів рішення нелінійних динамічних задач, що припускають лінеаризацію нелінійних систем, а також прямих методів нелінійного аналізу. Розглядаються існуючі підходи для аналізу динаміки підконструкцій в рамках методик пониження розмірностей

матричних співвідносин МСЕ і деякі особливості їх використання при розрахунку вимушених нелінійних коливань складних механічних систем. Розглядаються існуючі методи розрахунку і аналізу вимушених нелінійних коливань пакетів лопаток.

В другому розділі розглянуті теоретичні і чисельні проблеми рішення задач пошуку періодичних режимів нелінійних коливань пакетів лопаток, аналізу стійкості, можливості розгалуження періодичних режимів, їх біфуркацій.

Вимушені коливання пакету лопаток під дією гармонічного збудження описуються системою диференціальних рівнянь в матричному вигляді:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t)\} + \{f(q, \dot{q})\}, \quad (1)$$

які на основі заміни перемінних

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad x = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}, \quad P = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}[F(t) + f(q, \dot{q})] \end{Bmatrix}$$

зводяться до системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку :

$$\dot{x} = Ax + P, \quad (2)$$

де x -вектор узагальнених перемішень; M , K , C -матриці мас, жорсткості і демпфування, відповідно; F - вектор-функція зовнішніх навантажень; f - нелінійна вектор-функція. Пошук періодичних режимів суттєво нелінійних коливальних систем здійснюється рішенням двохточечної краєвої задачі, до якої зводиться (2), доповнена початковими умовами $x_0 = x(t_0)$ та умовою періодичності $x_T = x(t_0 + kT)$, а саме, до рішення неявно наданого рівняння:

$$\Psi(x_0) = x_T(x_0) - x_0 = 0 \quad (3)$$

Для рішення систем алгебраїчних нелінійних рівнянь часто використовують метод Ньютона, але рамки його застосування обмежені низкою недоліків до яких можливо віднести: відсутність глобальної збіжності для багатьох задач; необхідність визначення матриці Якобі на кожній ітерації; необхідність у рішенні на кожній ітерації системи лінійних рівнянь, яка може бути виродженою чи пагано обумовленою. В дисертаційній роботі використовується квазиньютонівський алгоритм, що теоретично має глобальну збіжність з любого початкового наближення, а практично, значно розширює області збіжності.

За допомогою алгоритму пошуку періодичних режимів коливань суттєво нелінійних систем розшуковуються як стійки, так і нестійки періодичні режими. Причому, при наданих значеннях параметрів може існувати декілька різних її періодичних режимів. З усього набору отримуваних стійких і нестійких режимів

коливань найбільший практичний інтерес для дослідження викликають стійкі режими коливань. В зв'язку з цим, велике значення набуває дослідження стійкості вимушених коливань пакетів лопаток. В роботі реалізован підхід, оснований на другому методі Ляпунова для дослідження стійкості періодичних рішень рівнянь коливань. Відповідно йому аналіз стійкості періодичних режимів проводиться шляхом дослідження матриці Якобі, що отримується в ітераційному процесі квазиньютонівського алгоритму і що є наближенням матриці монодромії рівнянь збуреного руху. Для дослідження питання про стійкість періодичного режиму вираховуються власні значення λ_k (мультиплікатори) матриці Якобі, та якщо виконується умова

$$\rho = \max |\lambda_k| \leq 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

то періодичний режим вважається стійким. По зміні характеру втрати стійкості періодичних режимів, при зміні частоти збудження, проводиться оцінка можливості існування точок розгалуження рішень. Для аналізу типу розгалуження періодичних рішень, в разі зміни стійкості, в роботі досліджуються сукупності мультиплікаторів Флоке и робиться висновок про умови існування додаткових суб-, супергармонічних і дрібних режимів в частотній області, що розглядається.

Рішення низки тестових задач є свідотством ефективності застосованих підходів. Аналіз ефективності квазиньютонівського алгоритму проводиться на рішенні тестових задач для низки нелінійних функцій (розширена функція Розенброка, узагальнена функція Пауела та інших) з використанням розробленого програмного забезпечення. Результати тестування показують стійку збіжність розрахункової схеми навіть з дуже "поганих" початкових наближень. Проведено порівняння результатів чисельних досліджень нелінійних осциляторів з кубичною і кусочно-лінійною трьохланковою пружною характеристикою з відомими аналітичними рішеннями. Аналіз результатів точечних відображень на стробоскопічну площину показує добрий збіг областей притягання періодичних режимів. Отриманні процеси у часі суб-, супергармонічних і дрібних режимів коливань та їх спектральний аналіз теж дають гарний якісний і кількісний збіг.

Проводиться всебічний аналіз вимушених коливань вигину пакета з 4-ох одномасових моделей лопаток, з'єднаних трьома міжлопаточними зв'язками з нелінійними (кусочно-лінійними) пружними характеристиками для різноманітних значень зазорів, натягів по полках. На рис. 1. наведено приклад амплітудно-частотної залежності для випадка існування натягів між полками. Характерним для системи з такими параметрами є наявність широких частотних зон, в яких існують декілька

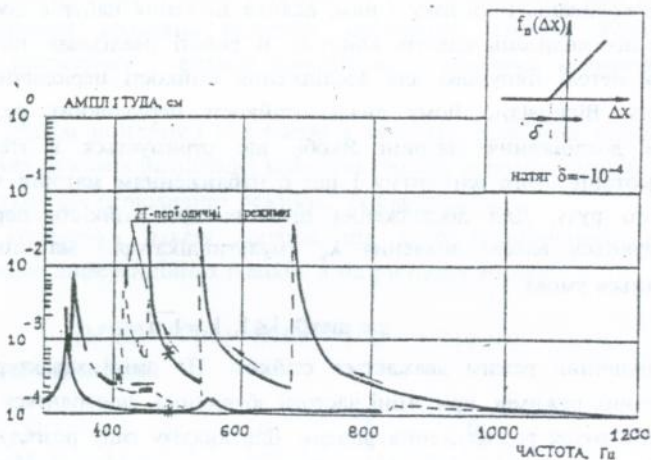


Рис. 1. Амплітудно-частотна характеристика пакету з 4-ох лопаток з кусочно-лінійною пружньою характеристикою міжлопаточного зв'язку з натягом.

стійких та нестійких режимів коливань. Причому, для наданої частоти та рівня збудження можуть існувати, окрім основного періодичного режиму, також декілька суб- і супергармонічних режимів коливань з амплітудними значеннями, що перевищують значення основних режимів (див. рис.2).

Крім того, зміни параметрів кусочно-лінійних характеристик міжлопаточних зв'язків можуть викликати зміщення резонансних піків для нелінійних амплітудно-частотних характеристик відносно резонансів лінійних систем, зміну стійкості і величин амплітуд коливань пакетів на фіксованих частотах збудження при зміні якого-небудь з параметрів системи, наприклад, величини зазору чи натягу (рис.3). Для прийнятої моделі пакету лопаток показана складність і неоднозначність динамічних процесів, що діються в системі лопаток, з'єднаних бандажними полками і передбачають відносне зміщення їх поверхней.

В третьому розділі розглянуті питання пов'язані з використанням більш точних скінченоелементних і суперелементних моделей лопаток при чисельних дослідженнях вимушених нелінійних коливань пакетів, а також методика зниження розмірності матричних співвідносин МСЕ при зберіганні потрібної точності результатів.

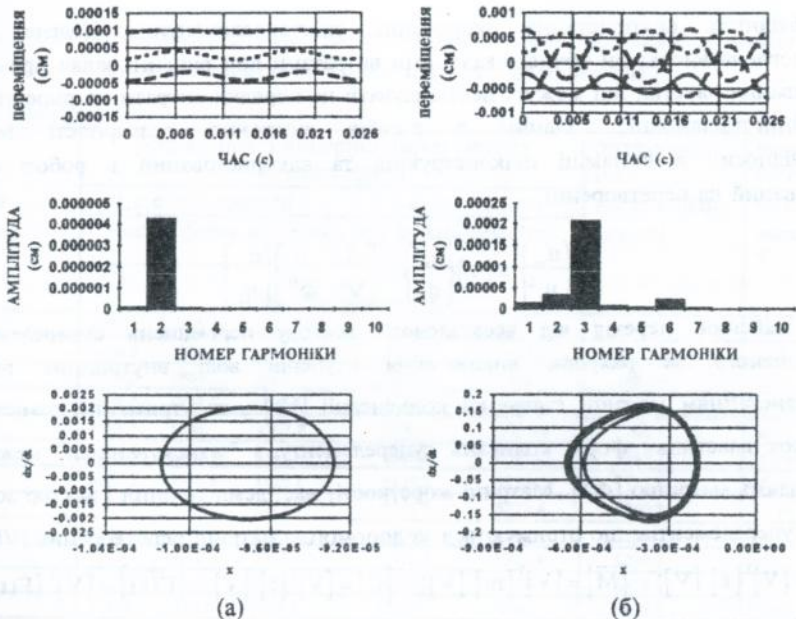
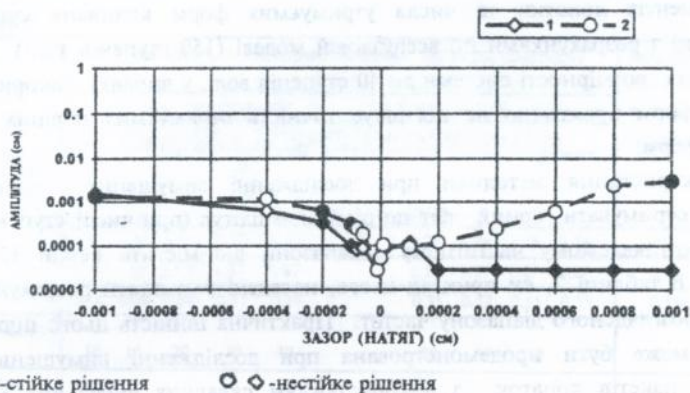


Рис. 2. Процес у часі перемішень лопаток пакету, гістограма спектрального аналізу і фазовий портрет коливань: а- основного режиму; б- субгармонічного режиму порядку 3/2.



● — стійке рішення ○ — нестійке рішення

Рис.3 Залежність величини амплітуди коливань пакету лопаток від величини зазору (натягу) на частоті збудження 478 (Гц) з двох різних початкових умов.

Необхідність використання скорочених скінченоелементних моделей лопаток обумовлена високими обчислювальними витратами при рішенні задач про нелінійні коливання пакетів, які можуть перевищувати на порядки витрати на рішення задач в лінійній постановці. Одним з засобів зниження розмірності матричних співвідносин в динаміці підконструкцій та використований в роботі є метод, оснований на перетворенні

$$\begin{Bmatrix} u_m \\ u_s \end{Bmatrix} = [V] \begin{Bmatrix} q_m \\ q_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ V^c & \Phi^N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ q_s \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

що здійснює перехід від всевузлового вектору переміщень суперелементу до скороченого за рахунок виключення ступенів волі внутрішніх вузлів за використанням матриці статичної конденсації $[V^c]$, та утриманні, замість цього, кількох властивих форм коливань суперелементу з "затискуваними" межами, що складають матрицю $[\Phi^N]$. Матриці жорсткості, мас, демпфування і вектор зовнішніх сил суперелементів, що отримуються за допомогою матриці перетворення $[V]$:

$$[\bar{K}] = [V]^T [k] [V]; \quad [\bar{M}] = [V]^T [m] [V]; \quad [\bar{C}] = [V]^T [c] [V]; \quad \{\bar{F}(t)\} = [V]^T \{F(t)\} \quad (6)$$

дозволяють значно знизити порядок матричних рівнянь коливань при зберіганні потрібної точності результатів. Проведен порівняльний аналіз вільних і вимушених коливань вигину пакету з 5-ти лопаток, що були отримані по всевузловій і скороченій моделям. В таблиці 1 наведені результати розрахунків для різного числа суперелементів лопатки та числа утримуємих форм коливань суперелементу в порівнянні з розрахунками по всевузловій моделі (150 ступенів волі). Показано, що скорочення розмірності системи до 40 ступенів волі, у випадку використання метода синтезу форм практично не погіршує точність отримуваних перших 12 властивих частот і форм.

Використання методики при дослідженні вимушених коливань пакетів дозволяє отримувати гарний збіг по рівням амплітуд (при числі ступенів волі >20) у всьому розглядаємому частотному діапазоні, що містить перші 12 резонансних режимів. В таблиці 2, як приклад цього, наведені результати розрахунків для трьох частот з розгляденого діапазону частот. Практична цінність цього підходу найбільш яскраво може бути продемонстрована при дослідженні вимушених нелінійних коливань пакетів лопаток з використанням складних чисельних методів таких, наприклад, як ітераційні, коли на кожній ітерації алгоритму отримання періодичних рішень необхідно часто $2n+1$ інтегрування системи диференціальних

рівнянь. Обчислювальні витрати на проведення таких розрахунків можуть бути скорочені за рахунок використання даного підходу в декілька разів.

Таблиця 1.

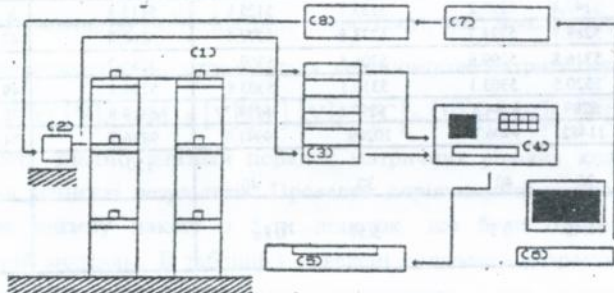
номер частоти	розрахунок з використанням метода синтезу форм					розрахунок по всевузловій моделі	максим. погрішн. по усім частотам %
	1 с.е. по лопатці		2 с.е. по лопатці				
	число форм коливань для суперелементу						
	1	2	6	1	2		
	властиві частоти (Гц)						
1	415.5	415.3	415.3	415.3	415.3	413.7	0.435
2	1656.2	1654.2	1654.1	1654.5	1654.2	1652.5	0.22
3	1665.9	1664.1	1663.9	1664.3	1664.	1662.6	0.33
4	1696.5	1694.7	1694.5	1695.	1694.6	1691.7	0.283
5	1709.8	1708.	1707.8	1708.3	1707.9	1709.1	-0.07
6	2347.5	2342.7	2341.1	2343.8	2341.2	2345.7	-0.196
7	6973.2	5147.8	5125.2	5133.2	5125.8	5113.4	36.37
8	7751.3	5289.7	5271.7	5278.8	5272.4	5260.8	47.34
9	7892.7	5316.8	5299.6	5306.4	5300.	5286.7	49.3
10	7917.9	5320.5	5303.1	5310.1	5303.8	5289.1	49.7
11	11270.6	6289.2	6284.5	6297.6	6284.7	6319.8	78.33
12	17194.9	11482.	9906.1	10209.	9941.6	9856.7	74.44
число с.в. системи	15	20	40	30	40	150	
максимальна погр. по усім варіантам %	74.4	16.48	0.5	3.57	0.86		

Таблиця 2.

частота (Гц)	розрахунок з використанням метода синтезу форм									розрахунок по всевузловій моделі
	1 с.е. по лопатці				2 с.е. по лопатці					
	число форм коливань для суперелемента									
	0	1	2	4	6	0	1	2	4	
	амплітуда *10 (см)									
3000	5.47	3.69	3.77	3.78	3.79	3.78	3.78	3.78	3.78	3.93
5000	1.11	1.04	1.89	1.87	1.87	1.11	1.87	1.87	1.87	1.91
9000	0.3	0.29	0.34	0.55	0.56	0.35	0.52	0.55	0.55	0.588
кількість с.в. системи	10	15	20	30	40	20	30	40	60	150
максимальна погрішність по усім варіантам розрахунків %	48.8	45.5	42.3	5.2	5	40.3	10.8	5.2	5.2	

В четвертому розділі обговорюються підходи проведення експериментальних досліджень динаміки конструкцій: метод функції частотної реакції, що використовується в роботі при проведенні модального аналізу конструкції, а також розробленої схеми проведення експериментальних досліджень вимушених нелінійних коливань.

Експериментальні дослідження моделі пакету лопаток, що була створена, проведені на обладнанні та при технічному сприянні Інституту загальної механіки Технічного університету, м. Відень, Австрія. Вивчення нелінійної поведінки моделі пакету лопаток під дією гармонічного збудження і з урахуванням різних умов взаємодії частин моделі (однобічний контакт, попередній натяг, зазор) проведено за допомогою експериментальної схеми, що надана на рис. 4, та пакету прикладних програм LABVIEW (National Instruments Corporation) для улаштування схеми збудження.



- 1- акселерометр; 2- вібратор; 3- низка посилювачей заряду;
- 4- цифровий спектральний аналізатор; 5- плотер;
- 6- комп'ютер; 7- генератор; 8- посилювач потужності.

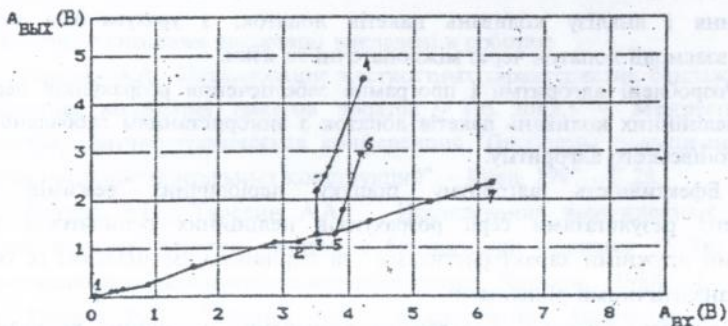
Рис. 4. Експериментальна модель і обладнання, що використовується.

Аналізувались амплітудно-частотні характеристики нелінійної системи, та виявлялись частотні області з чітко вираженою нелінійною поведінкою моделі пакету лопаток. На частотах збудження з цих областей отримані залежності амплітуд вихідного сигналу від амплітуд вхідного, як, наприклад, на рис.5. Показані характерні особливості, що властиві періодичним режимам коливань моделі пакету з нелінійним зв'язком:

- багаторежимність коливань на фіксованих частотах збудження (див. рис.5);

- нестійкість деяких періодичних режимів;
- суттєва негармонічність коливань моделі пакету.

Проводиться спектральний аналіз, отримувемих в експерименті періодичних режимів; показана можливість реалізації субгармонічних режимів з амплітудами, що перевищують амплітуди основного режиму. Як приклад отриманих субгармонічних режимів, на рис. 6 надані: процес у часі і результати спектрального аналізу субгармонічного режима порядку 1/10 для амплітуди навантаження точки 3 (див. рис. 5).



- 1-2, 5-7 - основний режим коливань;
 3-4 - субгармонічний режим порядку 1/2;
 5-6 - субгармонічний режим порядку 1/10;

Рис. 5. Залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди збудження на частоті 12 Гц.

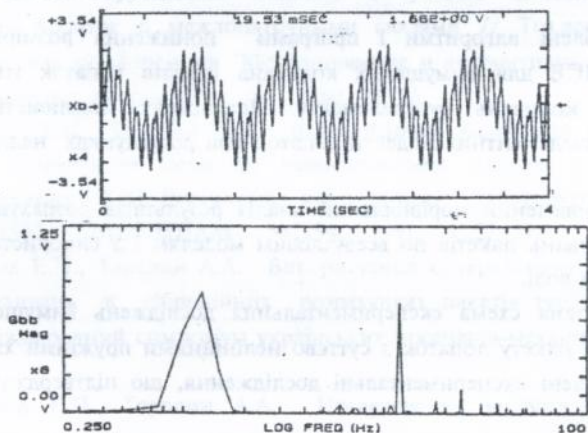


Рис. 6. Субгармонічний режим порядку 1/10 та його спектральний склад.

Оцінка адекватності математичної та експериментальної моделі пакету лопаток проводиться чисельним дослідженням вимушених нелінійних коливань моделі і співставленням результатів розрахунків з експериментальними даними на частотах та з амплітудами збудження, для яких характерно існування декількох стійких періодичних режимів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ.

1. Був проведений аналітичний огляд літератури з питань чисельного моделювання і аналізу коливань пакетів лопаток, з урахуванням нелінійного характеру взаємодії лопаток через міжлопаточні зв'язки.

2. Розроблені алгоритми і програмне забезпечення розрахунків періодичних режимів нелінійних коливань пакетів лопаток з використанням глобально-збіжного квазиньютонівського алгоритму.

3. Ефективність алгоритму пошуку періодичних режимів коливань підтверджена результатами серії розрахунків нелінійних осциляторів з суттєво нелійними пружними характеристиками та порівняльним аналізом їх коливань з відомими аналітичними рішеннями.

4. Проведені чисельні дослідження вимушених нелінійних коливань систем одномасових моделей лопаток з кусочно-лінійними пружними характеристиками міжлопаточних зв'язків; був проведений аналіз впливу конструктивних параметрів системи на коливання пакетів лопаток, їх стійкість, можливість розгалуження періодичних режимів, виникання суб-, супергармонійних і дрібних режимів коливань.

5. Розроблені алгоритми і програми пониження розмірності матричних співвідносин МСЕ для вимушених коливань пакетів лопаток на основі метода синтезу форм коливань суперелементу. Досліджена можливість використання великих скінечноелементних моделей лопаток при розрахунках нелінійних коливань пакетів.

6. Був проведений порівняльний аналіз результатів розрахунків властивих і вимушених коливань пакетів по всеузловим моделям і з використанням методики редукції ступенів волі.

7. Розроблена схема експериментальних досліджень вимушених нелінійних коливань моделі пакету лопаток з суттєво нелійними пружними характеристиками зв'язків і проведені експериментальні дослідження, що підтверджують існування і

достовірність отриманих на основі чисельного моделювання нелінійних ефектів: багаторежимність, нестійкість коливаль, існування суб-, супергармонічних режимів.

8. Частина прикладного програмного забезпечення, розробленого в дисертаційній роботі була включеною в створений на кафедрі "Динаміка і міцність машин", ХДПУ комплекс програм, що призначений для аналізу вібрацій робочих колес турбомашин, який втілений в практику проектування на НВО "Турбоатом" (м. Харків).

Основні положення дисертації викладені в роботах:

1. Тарелин А.А. Исследование жесткостных характеристик бандажных полок и их влияния на колебания пакетов лопаток // Тез. докл.: V Межреспубликанская студенческая научно-техническая конференция "Проблемы повышения прочности элементов машиностроительных конструкций". - Киев, 1987.- С.25.

2. Петров Е.П., Тарелин А.А. Исследование вынужденных нелинейных колебаний моделей пакетов лопаток с бандажными полками // Тез. докл.: XVI Научно-техническая конференция молодых ученых, Харьков. -1988. - С. -41

3. Петров Е.П., Тарелин А.А. Исследование линейных и нелинейных колебаний рабочих колес турбомашин с использованием конечноэлементных моделей бандажных полок // Тез. докл.: XXII Всесоюзное научное совещание по проблемам прочности двигателей, - Москва. - 1988. - С.148-150

4. Петров Е.П., Тарелин А.А. Расчет периодических режимов вынужденных колебаний пакетов турбинных лопаток с учетом нелинейного характера взаимодействия лопаток с межлопаточными связями // Тез. докл.: Региональная научно-техническая конференция "Моделирование и автоматизация проектирования сложных технических систем", Калуга. - 1990. - С.10.

5. Петров Е.П., Тарелин А.А. Вынужденные колебания пакетов турбинных лопаток при нелинейном характере взаимодействия лопаток с межлопаточными связями // Тез. докл.: XIII Всесоюзная конференция "Аэроупругость турбомашин", Севастополь, 1991. - Труды ЦИАМ. - №1294. - 1991. - С.22-23.

6. Петров Е.П., Тарелин А.А. Використання суперелементів і методу синтезу їх форм коливаль в вібраційних розрахунках пакетів турбінних лопаток // Тез. доп.: I Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, 1993. - С.239-240.

7. Петров Е.П., Тарелин А.А. Исследование вынужденных нелинейных колебаний пакетов лопаток с изменяющимися условиями их взаимодействия //

Тез. докл.: XXV Международное научно-техническое совещание по проблемам прочности двигателей, Москва, 1994. - С.48-49

8. Аннопольская И.Е., Петров Е.П., Тарелин А.А., Конев В.А. К оценке основных характеристик последней ступени в условиях окружной и радиальной неравномерностей полей скоростей и давлений на входе в патрубок // Тез. докл.: Международная научно-техническая конференция: "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов". Змиев, 1994, - С.79-80.

9. Петров Е.П., Тарелин А.А. Анализ суб-, супергармонических и основных периодических режимов нелинейных колебаний пакетов лопаток // Тез. докл.: Международная научно-техническая конференция: "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов", Змиев, 1994, - С.60-61

Тарелин А.А. "Исследование нелинейных колебаний пакетов турбинных лопаток с бандажными полками". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06-динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, Харьковский государственный политехнический университет, г. Харьков, 1994 .

Рассматриваются вопросы, связанные с исследованием и анализом нелинейных колебаний пакетов лопаток, которые обусловлены изменением в процессе колебаний условий взаимодействия лопаток по бандажным полкам. Пакет лопаток рассматривается как система с большим числом степеней свободы и с большим числом существенно нелинейных упругих элементов межлопаточных связей. Разработанные алгоритмы и программы расчета позволяют исследовать устойчивость и возможные бифуркации получаемых периодических режимов. Для снижения вычислительных затрат при решении задач о вынужденных нелинейных колебаниях пакетов лопаток и в случае использования больших конечноэлементных моделей лопаток используется методика понижения размерности матричных соотношений МКЭ. Результаты численных и экспериментальных исследований нелинейных колебаний пакетов лопаток показывают возможность существования: частотных областей многорежимности; устойчивых и неустойчивых основных, суб- и супергармонических режимов колебаний.

Ключові слова: пакет лопаток, нелінійні коливання, періодичні режими, стійкість, суб- та супергармонічні коливання.

Tarelin A.A. Investigation of Nonlinear Vibrations of Shrouded Turbine Blade Packets.

Nonlinear interaction of turbine blades in packets connected with changes of shroud contact conditions in a course of forced vibration is considered. Blade packet with shrouds is a multy-degree of freedom and multy-nonlinear system with essential nonlinearity. Worked out algorithms and software allows to investigate stability and bifurcation of periodical response of blade packets taking into account various blade models. For decreasing of calculation expenditures of nonlinear analysis and in the case of usage a big FEM models for more exact simulation of turbine blade packet vibrations the efficient dynamic reduction method is used. The results of numerical and experimental simulation of nonlinear vibration of blade packets display such nonlinear features of examined system as: multyregime behavior, sub-, superharmonic response, etc.



Підп. до друку 5.12.94. Формат 60x90 1/16

Папір друк. №1. Ум. друк. арк. 1,0.

Обл.-вид. арк. 1,0.

Тираж 100 прим. Зам. №393.

Ризограф Інституту проблем машинобудування НАН України
310046, м. Харків, вул. Пожарського 2/10.

455930

31.571
AB 31.571