

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Гардер Сергій Євгенійович

УДК 539.3

**АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ГЕОМЕТРИЧНО ЗМІНЮВАНИХ КОНСТРУКЦІЯХ НА
ОСНОВІ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Спеціальність 05.02.09 – Динаміка та міцність машин.

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі прикладної математики Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Голоскоков Євген Григорович,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри систем та процесів управління

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Сімсон Едуард Альфредович,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри опору матеріалів;

кандидат технічних наук, доцент
Боронко Олег Олександрович
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,
Заступник директора Механіко-машинобудівного інститута

Провідна установа:

Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного, Національна Академія Наук України, м. Харків.

Захист відбудеться “22” січня 2003 р. о 14³⁰ 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 ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “19 “ грудня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Бортовой В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Проектування нових конструкцій завжди має компромісний характер внаслідок багатьох суперечливих вимог до техніко-економічних показників. Це приводить до необхідності сумісного використання експериментальних та розрахункових методів на етапі проектування. Значення математичних методів зростає при розробці дрібносерійної техніки, коли тривалість та висока вартість виготовлення зразка роблять неможливими проведення всебічних експериментальних досліджень. Альтернативою натурних досліджень є чисельні експерименти над математичною моделлю машини. Якість одержаних в них результатів пов'язана з удосконаленням методів, що застосовуються.

Найбільш ефективним в таких умовах є метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє побудувати математичну модель з високим ступенем адекватності об'єкту дослідження і автоматизувати процес укладання відповідних рівнянь. Вдосконалення обчислювальної техніки дозволили впровадити у практику інженерних розрахунків велику кількість програмних скінченно-елементних комплексів - "Лира", "Cosmos", "GIFT" "Ansys", "NASTRAN" та ін.

Однак, для ряду об'єктів застосування цих комплексів викликає труднощі. Особливостями таких об'єктів є поєднання складної просторової конструкції робочого органу, що змінює геометричну конфігурацію при взаємодії з низкою привідних механізмів, аперіодичність рухів, тривалість перехідних режимів роботи. Тема даної роботи є застосування МСЕ для вивчення перехідних процесів в просторових пружно-деформованих механічних системах змінюваної геометрії, тобто машин, у яких при роботі змінюється взаємне просторове розташування частин конструкції.

Специфіка даних конструкцій призводить до необхідності врахування наступних особливостей:

- під час математичного моделювання з'являються додаткові ступені свободи, внаслідок переміщень скінчених елементів (СЕ) як абсолютно твердих тіл, при цьому матриці коефіцієнтів в рівняннях стають виродженими;
- необхідно додавати до системи рівняння привідних механізмів;
- наявність в конструкції односторонніх зв'язків, що не можуть бути описані за МСЕ і моделюються як гнучкі пружні нитки;
- система рівнянь руху, як правило, нелінійна.

Об'єднання перелічених особливостей в одній математичній моделі з використанням МСЕ не знайшло свого повного вирішення. Таким чином, проблема розширення області застосування МСЕ в динаміці подібних машин і врахування означених особливостей є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота є розвитком науково-дослідних робіт проблемної лабораторії “Динаміка та міцність машин” у рамках теми 1.10.2.9 “Коливання при детермінованому та випадковому навантажуванні складних вузлів машин та конструкцій та їх оптимізація” (постанова Президії АН УРСР), та господарських робіт “Розробка методики і створення програм для дослідження перехідних процесів в стріловій системі під час сумісної роботи механізмів порталних кранів” 1980-1982 рр., “Створення пакету прикладних програм для чисельного дослідження динаміки сумісних рухів порталних та мостових кранів з урахуванням податливості елементів конструкцій і для дослідження їх пружно-деформованого стану” 1983-1992 рр., виконаних на кафедрі систем та процесів управління; а також пов’язана з координованою Міністерством освіти та науки України держбюджетною темою “Створення і вдосконалення конструктивних засобів математики для комп’ютерного моделювання нелінійного деформування елементів тонкостінних конструкцій (шифр М901, № д./р. 0100V001666, 2000-2001р.р. Результати роботи використано при проектуванні порталного крана в об’єднанні “Ленподъемтрансмаш”.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка на основі МСЕ методики аналізу перехідних процесів в геометрично змінюваних конструкціях щодо потреб проектування сучасних машин. Для досягнення поставленої мети були сформульовані і розв’язані наступні задачі;

- сформульовані і розглянуті теоретичні основи застосування МСЕ щодо розрахунку динаміки механічних систем змінюваної геометрії, побудована та досліджена система рівнянь СЕ, що рухається у просторі;

- розвинуті в роботі методики застосовані до вибраного об’єкту дослідження – порталного крана, як типового представника класу машин зі змінюваною геометрією, розроблена його математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь;

- проведені чисельні експерименти з метою удосконалення моделі та порівняння результатів, отриманих на математичній моделі з даними натурного експерименту;

- розроблена методика оцінювання динамічної якості спроектованого порталного крана з використанням поняття “базового” робочого циклу, засобів математичної статистики і теорії випадкових процесів.

Об’єктом дослідження є машинобудівні конструкції зі змінюваною геометричною конфігурацією.

Предмет дослідження - розповсюдження МСЕ на задачі аналізу і оцінювання динамічних та міцносних характеристик машинобудівних конструкцій зі змінюваною геометричною конфігурацією.

Методи дослідження базуються на використанні чисельних методів, теорії коливань, пружності, МСЕ, математичної статистики, теорії випадкових функцій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- отримана і досліджена система рівнянь руху довільного СЕ;
- розвинута методика застосування МСЕ до об'єктів зі змінюваною геометрією, яка дозволяє автоматизувати процес побудови системи диференційних рівнянь динаміки;
- вперше побудована математична модель роботи порталного крана з урахуванням податливості основних елементів конструкції, особливостей роботи привідних механізмів і вантажної підвіски; модель реалізована у вигляді пакета прикладних програм для ПЕОМ.
- виконані дослідження впливу податливості елементів металоконструкції на динамічні характеристики порталного крана.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані методики дозволяють в значній мірі автоматизувати процес складання диференційних рівнянь математичної моделі динаміки системи змінюваної геометрії. Розроблені програми для ПЕОМ можуть бути використані в проектних установах для удосконалення існуючих конструкцій та в системах автоматизованого проектування нових машин різноманітного призначення.

Апробація результатів дисертації. Результати проведених досліджень доповідалися на наступних конференціях:

“Всесоюзна конференція з вібраційної техніки” м. Телаві, листопад 1984 р.; “Всесоюзна конференція з вібраційної техніки” м. Кобулеті, листопад 1987 р.; Наукова конференція ХПІ “Сучасні проблеми динаміки, міцності і оптимізації в машинобудуванні”, м. Харків 1990 р.; Республіканська конференція “Міцність і коливання конструкцій під час вібрацій і сейсмічних навантажень”, м. Севастополь, 1992 р.; Міжнародна конференція, м. Харків, 1996 р.; Міжнародна конференція, м. Харків, 2001 р. В повному обсязі робота обговорювалася на наукових семінарах кафедр динаміки і міцності машин” та прикладної математики Національного технічного університету “ХПІ”.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, з них 5 статей у фахових виданнях України.

Особистий внесок здобувача. Побудована система рівнянь динаміки СЕ, що рухається, проведений якісний аналіз цієї системи. На базі цих рівнянь розроблена методика застосування МСЕ для розв'язання задач динаміки конструкцій змінюваної геометрії. Створена математична модель порталного крана з урахуванням пружності металоконструкції. На базі експериментів, виконаних виробничим об'єднанням "Ленподъемтрансмаш", проведений порівняльний аналіз чисельних розрахунків і експерименту. Побудований ергодичний цикл роботи порталного крана. Проведені розрахунки оцінки впливу на динамічні характеристики крана деяких конструктивних параметрів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, і 3 додатків. Повний обсяг роботи 150 сторінок, у тому числі 36 ілюстрацій по тексту, 1 ілюстрація на окремому аркуші, 10 таблиць по тексту, 3 додатки на 12 сторінках, список використаних літературних джерел з 95 найменувань на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, наукова новизна, практичне значення, сформульовані мета та основні задачі дослідження, приведені відомості про особистий вклад автора, апробацію, публікації і структуру роботи.

В першому розділі наведений аналітичний огляд літератури з МСЕ в задачах динаміки конструкцій, особливостей його застосування у дослідженнях механічних систем змінюваної геометрії. Виділені напрямки перспективних досліджень в галузі розрахунків динаміки машин; використання стохастичних методів дослідження варіантів конструкцій з параметрами, що відрізняються.

В другому розділі отримані рівняння руху СЕ і системи СЕ в просторі, проведені їх аналіз. Для подальшого використання в розрахунках виділеного класу машин задачу конкретизовано для одновимірних СЕ.

СЕ довільної форми, що рухається у просторі, розглядається в наступних системах координат: $(\{X_1, X_2, X_3\})$ - глобальна система координат - (для опису переносного руху) нерухома, загальна для конструкції; (x_1, x_2, x_3) - локальна система координат, (для опису відносного руху) жорстко зв'язана з СЕ. В цих координатах вузлові пружні переміщення, відповідні числу ступенів свободи в вузлах, позначені вектором \vec{u} , що містить три лінійні та три кутові переміщення в кожному вузлі.

Вводиться вектор координат точки \vec{w} з шести компонентів: трьох лінійних і трьох кутових. В глобальній системі координат записується переміщення довільної точки СЕ

$$\vec{w} = \vec{X} + S\vec{x}' + S\vec{\delta}. \quad (1)$$

$\vec{X} = X_1, X_2, X_3, 0, 0, 0$ - вектор координат початку локальної системи відносно глобальної, $\vec{x}' = \{x_1', x_2', x_3', 0, 0, 0\}$ - вектор координат точки в локальній системі, $\vec{\delta}$ - вектор пружних переміщень (три лінійні і три кутові) цієї ж точки в локальній системі, S - ортогональна матриця перетворень координат (напрявляючих косинусів).

За допомогою функцій форми, $\vec{\delta} = \Phi \cdot \vec{u}$, $\vec{x} = \Phi\vec{x}'$ вектори переміщень \vec{w} і абсолютних швидкостей точки $\dot{\vec{w}}$ можна записати через вузлові переміщення:

$$\bar{w} = \bar{X} + S\Phi\bar{x} + S\Phi\bar{u}, \quad \dot{\bar{w}} = \dot{\bar{X}} + \dot{S} \cdot \Phi\bar{x} + S \cdot \Phi\dot{\bar{u}} + \dot{S} \cdot \Phi\bar{u} \quad (2)$$

Тут \bar{x} - вектор вузлових координат СЕ в локальній системі.

Вирази для кінетичної T і потенційної Π енергії СЕ:

$$T = 0,5\rho \int_V \dot{w}^T \dot{w} dv; \quad \Pi = 0,5\bar{u}^T C\bar{u} \quad (3)$$

Де ρ - щільність матеріалу, dV - елементарний об'єм, V - частина простору, яку займає СЕ, T - операція транспонування, C - матриця жорсткості СЕ.

Після виконання перетворень з урахуванням ортогональності матриці S та введення позначень:

$$\begin{aligned} m &= \int_V \rho dv; & M &= \int_V \rho \cdot \Phi^T \Phi \cdot dv, & R &= \int_V \rho \Phi^T \dot{S}^T \dot{S} \Phi dv; \\ A &= \int_V \rho \Phi^T \dot{S}^T S \Phi dv; & G &= \int_V \rho \dot{S} \Phi dv; & K &= \int_V \rho S \Phi dv, \end{aligned}$$

з урахуванням того, що $\dot{S} = -S\Omega_E$, де Ω_E - матриця проєкцій вектору миттєвої кутової швидкості обертання на осі локальної системи координат, отримаємо рівняння руху СЕ в формі Лагранжа.

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{u} + 2A\dot{u} + \mathbf{1}^T + R\ddot{u} + C\bar{u} &= \bar{Q}(t) - K^T \ddot{X} - 2G\dot{X} - \mathbf{1} + R\bar{x}; \\ 2G\ddot{u} + \dot{G}\bar{u} &= \bar{P}(t) - m\ddot{X} - \dot{G}\bar{x}; \\ \frac{1}{2}\bar{x}^T R'_{\omega_i} \bar{x} + \bar{x}^T R'_{\omega_i} \dot{u} + \dot{X}^T G'_{\omega_i} \dot{u} &= \bar{\Psi}(t) - G'_{\omega_i} \ddot{X} - \bar{x}^T \dot{G}'_{\omega_i} \dot{X}; \end{aligned} \right\} (i = \overline{1,3}). \quad (4)$$

де $\bar{X}(t)$ - узагальнені координати $\bar{u}, \varphi_i, (i = \overline{1,3})$ - три куту повороту;

$\bar{Q}(t), \bar{P}(t), \bar{\Psi}(t)$ - вектори узагальнених зовнішніх сил.

Таким чином, система рівнянь руху СЕ в загальному випадку складається з $(N+6)$ взаємозв'язаних нелінійних диференціальних рівнянь, де N - число вузлових переміщень СЕ. В роботі показано, що дана система рівнянь описує, як часткові випадки, різні види руху СЕ. Для подальшого використання рівняння (4) записуються в глобальній системі координат. Якщо СЕ входить до конструкції, то \bar{X} залежить від руху інших СЕ і визначається в функції положення провідної ланки. Тоді \bar{X}, φ_i можуть бути знайдені з рівнянь руху всієї конструкції як системи твердих тіл.

Рівняння рівноваги повинні виконуватися у кожному вузлі конструкції, тому укладання системи рівнянь СЕ - моделі полягає в додаванні діючих сил з боку всіх СЕ, які поєднуються в даному вузлі, що еквівалентно алгебраїчному додаванню матриць в рівняння (4). Для дослідження динаміки багатьох конструкцій цілком достатньо СЕ стрижневого типу. В роботі будуються матриці таких СЕ.

У третьому розділі наведена математична модель порталного десятитонного крана КПП. Методики, відпрацьовані на даному об'єкті можуть бути перенесені на інші подібні конструкції зі змінною геометрією.

Розрахункова схема металоконструкції крана зображена на рис. 1. СЕ ідентифікуються номерами початкового і кінцевого вузлів, деформування розглядається у рамках пружності. В кожному вузлі схеми вводяться по шість узагальнених переміщень: - три лінійних переміщення *i-того* вузла вздовж координатних висей X_1, X_2, X_3 і три кутових навколо відповідних осей. Відтяжка (3-7) розглядається як стрижень з шарнірно закріпленими вузлами 3 і 7 (жорстка відтяжка), або як гнучка пружна нить з жорсткістю на розтяг C_{om} (гнучка відтяжка). Портал включено до розрахункової схеми як суперелемент (10-11). В вузлі 9 – шарнір для моделювання опорного підшипника верхньої будівлі крану.

Рух крана як системи твердих тіл розглянуто в узагальнених координатах: φ_u - кут нахилу вісі недеформованої стріли до горизонту і φ_B - кут повороту крана навколо вісі X_3 . Вантаж на канаті вважається матеріальною точкою маси m_g . Рух його визначається у координатах x_{g1}, x_{g2}, x_{g3} , направлених вздовж відповідних висей глобальної системи. Початок x_{1g}, x_{2g}, x_{3g} - у центрі ваги непорушного в початковий момент вантажу. Під час роботи крана в грейферному режимі, зростання вантажу і розвантаження моделюються лінійним законом. Вантажний канат – абсолютно гнучка невагома пружна нитка жорсткості C_k .

Приводи крану і складаються з електродвигуна, муфти, гальм і знижувального редуктора. Їхні математичні моделі в даній роботі розглянуті в рамках пружно-дискретних систем.

Основними є приводи підйому вантажу (ПВ), повороту крана (ПК), зміни вилиту (ЗВ) стріли. Переміщення крана вздовж підкранового шляху – установча операція, тому до моделі не включене.

Розрахункова схема ПВ - одномасова. Приведений момент інерції - J_n , кут повороту - φ_n , вибирається як узагальнена координата.

ПК і ЗВ моделюються розрахунковими схемами з двома ступенями свободи. Вводяться узагальнені координати: φ_{IU} - кут повороту ротора електродвигуна ЗВ; φ_{2U} - кут повороту вихідного вала редуктора; φ_{1B} - кут повороту ротора електродвигуна ПК; φ_{2B} - кут повороту вихідного вала редуктора.

Під час роботи металоконструкція знаходиться під впливом сил власної ваги, вітру, і рушійних зусиль приводів. Для сил вітру з інтенсивністю q , приведення для окремого стрижневого СЕ елемента здійснюється до вузлів в відповідності з ДГСТ 1451-77.

Вузлові зусилля, при об'єднанні СЕ в систему складаються у вузлах дискретизації. Окрім розподілених сил власної ваги враховувалися зосереджені сили від рухомої противаги і ваги поворотної платформи. Ці зусилля додано до наявних в відповідних вузлах.

Рушійні зусилля привідних електродвигунів визначаються в функції кутової швидкості ведучої ланки. В схему управління приводами включені декілька проміжних пускових ступенів. Графіки ансамблю пускових механічних характеристик на кожній ступені регулювання близькі до прямих ліній, тому в роботі прийнята лінійна залежність між механічним моментом двигуна та кутовою швидкістю обертання ротору. Прийнята схема дозволяє моделювати більшість приводів, що ви користуються. Зміною величини моменту, числа ступенів регулювання і тривалості роботи на кожній характеристиці, враховано особливості системи управління.

В четвертому розділі представлено порівняння результатів чисельних і натурних експериментів, а також розв'язана задача розробки “типового” циклу роботи крана з застосуванням методів математичної статистики та теорії випадкових функцій. Всі дані про порталний кран були отримані на заводі - виготовнику. Набір вхідних даних програми та розроблений алгоритм дозволяють моделювати реальний експлуатаційний цикл роботи крана завданням моментів включення, тривалості та послідовності включення привідних механізмів.

Перевірка адекватності математичної моделі об'єкту дослідження проводилася у два етапи. На першому перевірялася правильність опису геометрії і статична урівноваженість порталного крану. Чисельні результати порівнювалися з паспортними даними крану. На другому етапі проведене порівняння з результатами натурального експерименту.

На рис 2 показані розрахункова і паспортна залежності величини зусилля в рейці механізму ЗВ, при номінальному вантажі 10т. від виліту. Відмінності пояснюються тим, що паспортна крива розрахована за умов рівноваги абсолютно жорсткого чотириланковика, який складає стрілова система, в моделі ж врахована податливість металокопструкції і стрілової системи.

Для перевірки динамічної відповідності моделі об'єкту, порівнювалися чисельні розрахунки з результатами випробувань порталного крану порту. Дані, зняті з осцилограми, дозволили провести моделювання циклу роботи крана. В якості основних величин прийняти зусилля в рейці ЗВ - S_r , момент на вторинному валу ЗВ - M . На рис. 3 наведений один з результатів - S_r , де чисельне рішення суміщене з обробленою осцилограмою експерименту.

Результати свідчать про якісний збіг експериментальних і розрахункових значень, але внаслідок нестационарності процесів і взаємовпливу частин конструкції кількісне зіставлення моделі з об'єктом на основі аналізу графіків утруднено.

Задачі оцінки міцності і довготривалої міцності повинні розглядатися з урахуванням особливостей функціонування машини, тобто робочої операції. Кран протягом експлуатації виконує

однотипні дії, тому можна говорити про циклічне повторювання його роботи - робочий цикл. Режими роботи порталних кранів визначаються багатьма випадковими чинниками. Тому, якщо на одному циклі отримані задовільні результати оцінки динамічних параметрів, то при іншому режимі експлуатації ці оцінки не збережуться. Виникає задача розробки “типового” циклу роботи, на якому можна було б досліджувати динаміку і порівнювати варіанти конструкції поза залежністю від умов та місця розташування крану.

Питання існування та проектування такого циклу досліджено і вирішено в даній роботі на основі теорії випадкових процесів. Усі величини, знайдені з рівнянь руху розглянуто як випадкові функції. Замість багатьох реалізацій конкретного робочого циклу, досліджувався більш тривалий, який складався з послідовності вихідних та формувався на основі реально існуючого, взятого з осцилограми випробувань. Для такого циклу випадковий процес набуває властивостей стаціонарності та ергодичності. Тому при розрахунках статистичні оцінки змінних знаходяться узагальненням в часі циклу, і стає можлива оцінка динамічних параметрів та порівняння конструкцій, що відрізняються, методами теорії випадкових процесів.

В основу побудови базового циклу покладено “елементарний” цикл, на якому проводилися натурні випробування крана. Тривалість його відповідає одній робочій операції (70 сек.). Базовий цикл конструювався як сума послідовних повторень “елементарного”. В кожному циклі, що додавався, моменти включення приводів, тривалість їхньої роботи, вага вантажу змінювалися в межах 10% випадковим чином. Накладалися обмеження на максимальні кути відхилення від вертикалі вантажного канату.

Достатньою умовою ергодичності вважалось зменшення нормованих автокореляційних функцій $k_x(\tau)$ усіх розрахункових величин випадкового процесу: $\lim_{\tau \rightarrow \infty} k_x(\tau) = 0$, де τ - інтервал часу між двома послідовними значеннями $k_x(\tau)$. Для всіх змінних, розглядуваних як випадкові функції, чисельно перевірялося виконання умови зменшення $k_x(\tau)$. Нормовані автокореляційні функції k_x чисельно обчислювалися по формулі

$$k_x(\tau) = (n - l - h_t)^{-1} \sum_{i=0}^{n-l} (x_i - m_x)(x_{i+l} - m_x) / D_x \quad (16)$$

Де n - кількість ординат знятих з графіка реалізації випадкової функції, h_t - кількість інтервалів часу Δt між сусідніми ординатами автокореляційної функції, m_x - математичне сподівання, D_x - дисперсія.

Практично, для всіх обчислюваних змінних спостерігалось зменшення $k_x(\tau)$. Їхні графіки наведені в роботі. На рис. 4, як приклад, наведена автокореляційна функція зусилля в рейці ЗВ. Розрахунки показали, що вже при тривалості базового циклу рівної трьох-чотирьох окремих, його

можна вважати ергодичним.

В *п'ятому розділі* подані результати чисельних розрахунків аналізу динаміки перехідних процесів в порталному крані на базовому циклі.

Порівнювалися динамічні навантаження в основному варіанті конструкції крана з величиною цих же навантажень для крана зі зміненою конструкцією: демпферу в рейці ЗВ, порталу, відтяжки.

Для всіх змінних розраховувались: інтегральна оцінка енергії процесу коливань як $\int_0^T |f(t)| dt$;

параметр ширини спектру коливань e ; найбільше та найменше значення змінних за цикл роботи; математичні сподівання MO ; середні квадратичні відхилення σ . Проведено також додаткову обробку результатів чисельних розрахунків основного варіанту порталного крана (як приклад - рис. 5).

Рис.5. Зусилля в рейці МЗВ

На цьому рисунку показані: залежність змінної Sr від часу, гістограма амплітуд гармонік при розкладанні в ряд Фур'є залежності Sr від часу для оцінки розподілу коливань за інтенсивностями та спек

	24	48	72	96	120	144	168	192	216	t(с)	
	Усиліе в рейке механизма изменения вылета										
0,44	$S_x(\omega_k) = D_k \Delta\omega$,										(17)

0,22 Де $\Delta\omega = \pi/T$ - інтервал частот, D_k - дисперсія амплітуд k -ї гармоніки, T – тривалість ци-

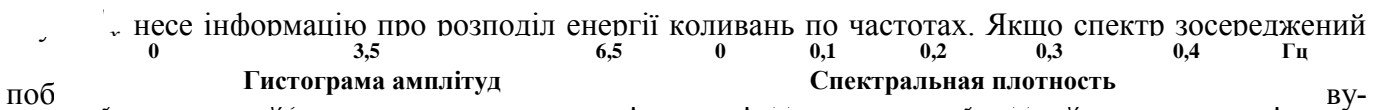
нуса несе інформацію про розподіл енергії коливань по частотах. Якщо спектр зосереджений в вузькому діапазоні частот, то він вузький, йому відповідає випадковий процес з майже постійним періодом. Якщо ж процес складається з гармонік, що несуть сумірну з сусідніми енергію, то спектр - широкий. В роботі ширина спектру e визначалася за формулами:

$$e = \sqrt{[1 - (1 - 2r)^2]}, \quad r = n_{max}^- (n_{max}^+ + n_{max}^-)^{-1} \quad (18),$$

Де n_{max}^+ , n_{max}^- - число позитивних і негативних максимумів на графіку залежності $f(t)$.

Якщо $e < 0.4$, те спектр вузький. Результати обчислень зведено в таблицю 1.

Таблиця 1. Значення параметру ширини спектру



	<i>Sr</i>	<i>Fot</i>	<i>Sk</i>	<i>H</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	<i>M</i>
e	0.99	0.71	0.73	0.97	0.75	0.91	0.86

В цій таблиці: *Sr* – зусилля в рейці ЗВ, *Fot* – зусилля у відтяжці, *H* – зусилля на кінці стріли в площині стрілової системи, *N* – зусилля стиску на стрілу, *T* – зусилля на кінці стріли в напрямку, перпендикулярному площині стрілової системи, *M* – момент на валі ПК.

Далі в роботі наведено результати чисельних експериментів з дослідження впливу на динамічні параметри гідравлічного демпфера в рейці ЗВ, жорсткості відтяжки і порталу. Зроблено висновки про можливість зниження динамічних навантажень шляхом раціонального вибору конструктивних параметрів.

ВИСНОВКИ

З результатів дисертаційної роботи можна зробити наступні основні висновки:

1. Розвинута методика застосування МСЕ для аналізу перехідних процесів в геометрично змінюваній рухомій механічній системі; побудовані диференційні рівняння руху окремого СЕ, проаналізовані якісні внески членів цих рівнянь. В явному виді наведені матриці жорсткості, мас, демпфірування для випадку СЕ стержневої форми. Наведений алгоритм, що дозволяє побудувати рівняння динаміки усього ансамблю СЕ з використанням ЕОМ.

2. Апробована методика побудови математичної моделі порталного крана, як прикладу машини зі змінною геометрією. Уперше розроблена модель, яка урахує податливість усіх складових частин металоконструкції, включає моделювання рушійних моментів електродвигунів, зовнішніх зусиль, враховує особливості системи управління.

3. На основі математичної моделі створений комплекс прикладних програм для ПЕОМ для дослідження роботи та аналізу динамічних параметрів об'єктів змінної геометрії. Вхідні дані програми включають велику кількість суттєвих параметрів і дозволяють моделювати машини, які мають великі конструктивні відмінності.

4. Зіставленням даних, отриманих в натурному експерименті та розрахункових залежностей, доведено задовільну якість математичної моделі та її адекватність реальному об'єкту дослідження.

5. Спроекований "базовий" робочий цикл на основі осцилограми натурних випробувань крана, який дозволяє моделювати роботу оператора крана. На базі цього циклу створений ергономічний, для оцінювання динаміки крана поза залежністю від режиму його роботи та характеру операції, місця розташування.

6. Проведені розрахунки з метою оцінювання динамічних параметрів основного варіанту конструкції крана та порівняння його з удосконаленням варіантом. При роботі з вантажем 10т значення коефіцієнтів динамічності для Зусилля у рейці ЗВ досягає 2.84, для зусилля в вантажних

канатах 3.07. Основна частина спектру усіх величин розміщена в області низькочастотних коливань з частотою порядку 0.3-0.6 гц, спектр широкий, що свідчить про розсіювання енергії в цілому діапазоні частот і про відсутність параметричних резонансів. Переважають коливання з малими амплітудами, що пояснюється великою жорсткістю конструкції.

Досліджений вплив на динамічні параметри крана:

а) наявність гідродинамічного демпфера в рейці ЗВ. Розрахунками доведено, що демпфер суттєво зменшує амплітуди динамічних зусиль; найбільше впливає на ЗВ. Найбільший вплив демпфера забезпечується при виборі коефіцієнту демпфірування $q=8 \cdot 10^5 \text{ кг/сек}^2$, жорсткості $C_u = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, (на базовому варіанті $q=2,8 \cdot 10^5 \text{ кг/сек}^2$, $C_u = 10^6 \text{ Н/м}$);

б) жорсткості відтяжки. Збільшення жорсткості до $2,56 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ (на базовому варіанті $1,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$) найбільш зменшує рівень динамічних навантажень на валі механізму ПК. ;

в) жорсткості порталу. Збільшення жорсткості портала дає незначне зменшенню амплітуд діючих сил в площині стрілової системи.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Голоскоков Е.Г., Гардер С.Е. Применение метода конечных элементов в задачах динамики систем переменной конфигурации // Динамика и прочность машин. – Харьков: Вища шк. Из-во при Харьк. ун-те, -1986. – вып. 44. – С. 81-84.

Здобувачу належить постановка задачі аналізу динаміки скінченного елемента, якій рухається у просторі, теоретичні дослідження, пов'язані з виводом рівнянь.

2. Гардер С.Е., Зайцев Ю.И. Построение алгоритма управления плоским движением маятниковой системы // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: Вища шк. Из-во при Харьк. ун-те, 1986. – №229 – С. 20-23.

Здобувачем проведено аналіз проблем, які виникають під час управління плоскою маятниковою системою, виведені основні рівняння.

3. Гардер С.Е., Голоскоков Е.Г. Исследование динамики портального крана при работе механизма изменения вылета. // Исследования оптимальных металлоконструкций и деталей подъемно-транспортных машин. Межвузовский научный сборник. Саратов: Издательство Саратовского университета, - 1987 - С.54-56.

Здобувачем отримані рівняння портального крана, виконані чисельні розрахунки та обробка результатів.

4. Гардер С.Е., Голоскоков Е.Г., Зайцев Ю.И. Оценка динамической нагруженности нестационарных процессов в динамических системах. // Динамика и прочность машин. – Харьков: ХГПУ - 1998 – вып. 56. – С. 102-105.

Здобувачем запропоновано чисельний алгоритм для оцінки навантаження динамічної системи - порталного крана з застосуванням теорії випадкових функцій.

5. Гардер С.Е. Моделирование базового рабочего цикла для исследования динамики порталных кранов. // Динамика и прочность машин. Харьков: - 2000. – вып. 57. – С. 115-120.

6. Гардер С.Е., Зайцев Ю.И., Корниль Т.Л., Математическая модель докового порталного крана. // Вестник Харьковского государственного технического университета – Харьков: - 2000, вып. 128 - С. 92-99.

Здобувачем отримані рівняння докового крана та обробка чисельних результатів на ЕОМ.

7. Гардер С.Е., Голоскоков Е.Г., Динамические уравнения движущегося конечного элемента. // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”: сборник научных трудов. - Харьков: НТУ “ХПИ”.- 2001.- №6 - С.21-25.

Здобувачем здійснено уточнення і розвиток раніше отриманих рівнянь рухомого скінченного елемента, висновки.

8. Голоскоков Е.Г., Гардер С.Е. Некоторые вопросы динамики систем переменной структуры // Тезисы Всесоюзной конференции по вибрационной технике. – Тбилиси: – 1984. - С. 208.

Здобувачем виведені рівняння руху стержневого скінченного та виконані чисельні розрахунки.

9. Голоскоков Е.Г. Гардер С.Е. Численная реализация метода конечных элементов для систем переменной структуры. // Тезисы Всесоюзной конференции по вибрационной технике. – Тбилиси: – 1987. - С. 80.

Здобувачем розроблені програми аналізу динаміки СЕ для ЕОМ , виконані чисельні розрахунки та обробка результатів.

10. Гардер С.Е., Голоскоков Е.Г., Исследование динамики механических систем на основе метода конечных элементов. // Материалы научной конференции “Прочность и колебания конструкций при вибрационных и сейсмических нагрузках”. – Запорожье: - 1993. – С. 10.

Здобувачем отримані рівняння динаміки порталного крана КПП10, розроблена програма для ЕОМ, виконані чисельні розрахунки.

АНОТАЦІЇ

Гардер С.Є. Аналіз перехідних процесів в геометрично змінюваних конструкціях на основі методу скінчених елементів. Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2002.

Дисертація присвячена розробці на основі методу скінчених елементів (МСЕ) методики аналізу перехідних процесів в геометрично змінюваних конструкціях для потреб сучасного проектування. Розвинуто теоретичні основи застосування МСЕ до розрахунку динаміки механічних систем змінної геометрії, побудована та досліджена система рівнянь СЕ, що рухається у просторі. Методики застосовано до вибраного об'єкту дослідження – порталного крана. Створено математичну модель та комплекс програм для ЕОМ на її основі. Проведено порівняння моделі з експериментом на діючому порталному крані. Розроблено методику оцінки динамічної якості спроектованого порталного крана з використанням поняття “базового” робочого циклу, засобів математичної статистики і теорії випадкових процесів. Досліджено вплив на динаміку порталного крану особливостей конструкції: параметрів гідромеханічного демпфера в рейці механізму зміни вилету, впливу жорсткості відтяжки та порталу.

Ключові слова метод скінчених елементів, геометрично змінювані конструкції, динамічні процеси у машинах, динамічні навантаження.

Гардер С.Е. Анализ переходных процессов в геометрически изменяемых конструкциях на основе метода конечных элементов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2001.

Метод конечных элементов (МКЕ) в настоящее время является одним из наиболее эффективных инструментов в численных исследованиях прочности и динамики различных машин. Однако, существует ряд объектов машиностроения, для которых применение МКЕ в его классической постановке затруднительно. Это машины, которые в процессе выполнения рабочей операции изменяют свою геометрическую конфигурацию из-за допустимости больших взаимных перемещений их конструктивных узлов без деформирования. К классу таких машин можно отнести порталные краны, экскаваторы, различные роботы-манипуляторы, узлы роторов вертолетов, ряд объектов космической техники и другие. Системы дифференциальных уравнений движения, описывающих подобные конструкции, содержат переменные коэффициенты и являются нелинейными.

Диссертация посвящена разработке на основе метода конечных элементов методики анализа переходных процессов в геометрически изменяемых конструкциях для потребностей современного проектирования в машиностроении.

В работе построена и исследована система матричных дифференциальных уравнений динамики движущегося отдельного конечного элемента произвольной формы в локальной системе координат, связанной с элементом, служащей для описания относительного движения элемента и в глобальной системе, общей для всего ансамбля конечных элементов. Показано, что в уравнениях

движения появляются дополнительные члены, связанные с движением конечного элемента. Дан алгоритм процесса формирования уравнений динамики конструкции, состоящей из конечных элементов. Методика конкретизирована для стержневого конечного элемента с шестью степенями свободы в узле. Для такого элемента в явном виде получены матрицы коэффициентов уравнений – жесткости, масс, демпфирования. Показана их переменная структура, обусловленная зависимостью от времени и координат.

Создана математическая модель динамики порталного крана КПП10, объединяющая конечноэлементные дифференциальные уравнения движения металлоконструкции, упруго-дискретные модели (дифференциальные уравнения) приводных механизмов с учетом применяемой системы управления и уравнения движения конструктивных элементов с односторонним деформированием – грузовых канатов. Разработан комплекс прикладных программ интегрирования уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка, обработки и представления результатов и для ПЭВМ на ее основе. Учет большого количества физико-механических и геометрических параметров объекта позволяет использовать данные программы на этапе проектирования машины.

Проведено сопоставление численных расчетов на математической модели с результатами натурных эксплуатационных экспериментов на работающем порталном кране, показавшее удовлетворительное соответствие модели реальному объекту исследования.

В работе показано, что исследования динамического поведения порталного крана невозможны без учета реальных условий его работы – выполняемой рабочей операции. Создана математическая модель перегрузочного цикла работы порталного крана, позволяющая имитировать действия оператора-крановщика. Перегрузочный цикл состоит из взятия груза (грейфирования), транспортировки его, разгрузки грейфера и возврата в исходную точку. На основе такой операции предложена методика оценки динамического качества спроектированного порталного крана по ряду параметров с использованием понятия “базового” рабочего цикла, состоящего из ряда подобных отдельных циклов и обладающего свойством эргодичности.

Обработка результатов численных экспериментов проведена с привлечением методов математической статистики и теории случайных процессов. Исследовано влияние на динамику крана ряда особенностей его конструкции: параметров гидромеханического демпфера, связанного с рейкой механизма изменения вылета, влияния жесткости портала, оттяжки и хобота.

Ключевые слова динамические процессы в машинах, динамические нагружения, метод конечных элементов, геометрически изменяемые конструкции.

Garder S.E. Transient analysis in geometrically changeable designs on the basis of a finite element method. - Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical science according to the

speciality 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute ", Kharkov, 2001.

The finite element method (FEM) is one of the most effective tool for researches of strength and dynamics of machines now. However, there is a series of designs, the application FEM is inconvenient to which one. It is machines with the geometrical configuration changeable: gantry cranes, excavators, manipulators etc. Dissertation is dedicated to mining on the basis FEM to an assay technique of transients in geometrically changeable designs for needs of modern designing. The differential equations of a driving finite element in local and global coordinate systems are constructed and studied. The technique of dynamical equations formation for design consisting of finite elements is refined. The mathematical model of dynamics of a gantry crane integrating of an FM-equation of a metallic structure, elastically discrete models of operating mechanisms and members with unilateral deforming - cargo cable ropes is built. The computer applications are designed. Matching model with outcomes of experiments on the working crane is conducted. The technique of an estimation of dynamic quality of the designed gantry crane with usage of concept of a "base" duty cycle, methods of mathematical statistics and theory of stochastic processes is offered. The influencing on the crane dynamics of design features is investigated: parameters of the hydro mechanical damper, bound with a screw rack mechanism of departure change, influencing of a jack house, a guy and a trunk rigidity.

Keywords a finite element method, geometrically changeable designs, dynamics processes of machines, dynamical load.

**АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ГЕОМЕТРИЧНО ЗМІНЮВАНИХ КОНСТРУЦІЯХ
НА ОСНОВІ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

ГАРДЕР СЕРГІЙ ЄВГЕНІЙОВИЧ

Відповідальний за випуск к.т.н., доц.Халипа В.М.

Підписано до друку 26.11.2002 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90/16. Папір Могра Друк - різнограф.

Обсяг 0,9 авт. арк..Наклад 100 примірників. Зам № 468

Видавничий центр НТУ "ХПІ". Свідотство ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ "ХПІ", 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
