

Відгук
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Горошка Андрія Володимировича
**«Методи оцінювання конструкційної міцності і зниження
вібрацій механічних систем на основі обернених задач»**
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми дисертаційної роботи. Проблема зниження вібрацій і підвищення міцності механічних систем є однією з головних у механіці і залишається актуальною. Для ефективного проектування механічних систем під час виконання міцнісного, частотного, модального аналізу тощо необхідно мати достовірні дані про їх реальні пружні, інерційні та демпфувальні параметри. Зокрема, у випадку проектування складних механічних систем, таких як авіадвигуни, сучасні САПР і комп'ютерні програми аналізу не дозволяють одержати ці значення з достатньою точністю, оскільки при проектуванні просто неможливо врахувати реальні умови функціонування всієї системи. Це обумовлює наступний тривалий процес доведення механічних систем. Натомість, згадувані параметри можна опосередковано одержати розрахунковим шляхом за допомогою інтерпретації даних вимірювань безпосередньо на механічному об'єкті, а це призводить до постановки обернених задач (ОЗ) різноманітних класів, методи розв'язання яких з заданою точністю потребують суттєвого вдосконалення.

Незважаючи на те, що на сьогодні існує потужний арсенал методів і програмного забезпечення для проведення теоретичних досліджень динаміки механічних систем на основі постановки і розв'язання ОЗ ідентифікації, постає потреба у розробці методів розв'язання ОЗ з урахуванням специфіки їх конструкцій і режимів експлуатації, розкиду реальних значень фізико-механічних характеристик, нестійкості моделі, статистичних методів обробки законів розподілу параметрів з полімодальним характером тощо. Для балансування гнучких роторів за коефіцієнтами впливу розв'язанням ОЗ можна ідентифікувати не лише дисбаланси багатомасового ротора, а й пружно-інерційні характеристики, підвищуючи таким чином адекватність математичної моделі коливальної системи. Для синтезу параметрів конструкції у моделі міцності, застосовуючи методи доозначення ОЗ, можна ідентифікувати фізико-механічні характеристики матеріалів конструкції, у разі, якщо вони є невідомими або їх значення мають неприпустимий природний розкид.

Є наявним *протиріччя* між необхідністю забезпечення заданого рівня міцності і вібрацій при проектуванні складних механічних систем шляхом урахування реальних ідентифікованих динамічних та конструктивних параметрів, і недостатньою розробленістю методів постановки і розв'язання ОЗ ідентифікації, пов'язаної з розкидом емпіричних значень, похибками обчислень і некоректністю задачі. Тому тема дисертації, спрямована на вирішення проблеми зрівноваження та оцінювання і забезпечення конструкційної міцності складних механічних систем шляхом ідентифікації їх параметрів методами обернених задач динаміки і міцності є *актуальною*.

Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи у цілому відповідає існуючим пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, затверджених на законодавчому рівні, зокрема у постанові КМУ від 07.09.2011 № 942: «Найважливіші проблеми фізико-математичних та технічних наук». Дисертаційна робота підготовлена у Хмельницькому національному університеті і відповідає науковим напрямкам «Динаміка і балансування швидкісних роторів» та «Статична і динамічна міцність виробів РЕА», які розвиваються на кафедрі основ проектування факультету

інженерної механіки. Робота виконувалася в рамках держбюджетних тем, які пройшли державну реєстрацію.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій роботи полягає в тому, що вони базуються на коректному використанні фундаментальних положень класичної механіки пружно-деформівного твердого тіла та теорії механічних коливань, опору матеріалів, застосуванні автором методу планування експериментів, математичної і прикладної статистики, теорії матриць, методів нелінійної оптимізації, високою збіжністю результатів експериментів з розрахунками.

Наукова новизна результатів роботи полягає у новому підході до проблеми зниження вібрацій і підвищення міцності, який полягає у розрахунку шуканих динамічних та конструктивних параметрів механічних систем на основі методів постановки і розв'язання ОЗ ідентифікації. Автор встановив «стійкі» і «нестійкі» ділянки частот обертання швидкісних пружно-деформівних роторів та розробив методи підвищення точності ідентифікації дисбалансів і пружно-інерційних характеристик, що враховують ступінь їх ідеалізації і умови експлуатації, метод пробних параметрів для доозначення ОЗ і обґрунтував достатню оцінку похибки їх розв'язків. Здобувач розробив метод оптимізації коефіцієнтів і вперше застосував метод головних компонент для лінійної фільтрації оцінок за методом найменших квадратів з метою зменшення похибки ідентифікації дисбалансів і пружно-інерційних характеристик роторів при балансуванні з урахуванням їх гнучкості. Він розвинув методи експериментального дослідження міцності машин шляхом апроксимації емпіричної полімодальної щільності розподілу ймовірностей сумішшю унімодальних законів та ідентифікацією ФМХ матеріалів при від'ємних температурах у пружно-деформованому стані, максимально наближеному до експлуатаційного. Здобувач розробив метод ідентифікації статистично-детермінованих та з розподіленими параметрами моделей МС. Розроблені вперше і удосконалені методи постановки обернених задач ідентифікації динамічних параметрів, збільшення адекватності динамічних і міцнісних моделей механічних систем дали можливість знизити вібрації турбонасосного агрегата (ТНА) і компресора газотурбінного двигуна, та забезпечити міцність компаундованих керамічних конструкцій електронної техніки.

Практичне значення одержаних результатів в першу чергу полягає в тому, що розроблені автором методи постановки і розв'язання ОЗ ідентифікації дозволяють на етапі проектування або доведення машин одержувати з необхідною точністю достовірні значення дисбалансів та пружно-інерційних характеристик МС зі швидкісними роторами, з урахуванням природного розкиду значень та статистичних законів розподілу з полімодальним характером; методи параметричного синтезу дозволяють визначити допустимі значення конструкторських параметрів МС за критеріями міцності. По-друге, запропоновані методи розширюють і доповнюють відомі результати досліджень зі зниження вібрацій гнучких роторів, а також методи аналізу АЧХ. Результати роботи знайшли безпосереднє використання і впровадження на підприємствах при зниженні вібрацій промислових вентиляторів і компресорів. В подальшому вони можуть бути використані при проектуванні сучасних машин та обладнання різного технологічного призначення, а також у науково-дослідницьких та навчальних процесах.

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 431 сторінку, містить 80 рисунків, 38 таблиць, список використаної літератури з 314 найменувань, 4 додатки.

У вступі автор обґрунтував актуальність теми дисертації, вказав на зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформулював мету і задачі дослідження, визначив наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, навів дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації і подав список публікацій.

Перший розділ присвячено всебічному огляду сучасного стану проблеми зниження вібрацій швидкісних роторів і забезпечення міцності при проектуванні МС. Для цих задач характерна відсутність достовірних даних про коефіцієнти динамічних та міцнісних моделей, проблеми розкиду реальних значень ФМХ, похибок статистичного оцінювання при обробці експериментальних даних, зокрема з полімодальними законами розподілу. Здобувач обґрунтував, що на основі постановки ОЗ, зокрема лінійних дискретних ОЗ ідентифікації за даними вимірювань та задач проектування (синтезу) можуть бути вирішені задачі ідентифікації динамічних та конструкторських параметрів, оптимальних для забезпечення міцності МС. Автор показав себе не лише знавцем динаміки і міцності, але і фахівцем з теорії обернених задач. Особливу увагу дисертант приділив питанням стійкості розв'язків та проблемі параметричного синтезу як ОЗ пошуку допустимих значень вхідних параметрів МС для виконання умов міцності. Проведений аналіз дозволив сформулювати задачі досліджень.

У другому розділі, який є основним, автор зосереджує увагу на обґрунтуванні та розробленні методів ідентифікації динамічних характеристик МС на основі ОЗ інтерпретації даних вимірювань. Так, автор розробив метод параметричної ідентифікації моделей МС шляхом доозначення ОЗ на основі вимірювань вхідних параметрів на пробних режимах МС. Таким методом може бути розв'язано багато задач динаміки і міцності, які до цього не мали розв'язку. Розроблено методи ідентифікації дисбалансів та пружно-інерційних характеристик гнучких роторів за результатами вимірювань динамічних прогинів на некритичних частотах обертання, а також за коефіцієнтами впливу. Дисертант дослідив стійкість цих методів і виявив ділянки найменш і найбільш стійких частот обертання, встановив зв'язок між складністю моделі, похибками вимірювань і точністю шуканих параметрів як без, так і з врахуванням гіроскопії. Автор детально дослідив і порівняв стійкість методів ідентифікації за статичними і динамічними коефіцієнтами впливу. Що стосується теорії обернених задач, то здобувач обґрунтував недостатність традиційної оцінки похибки розв'язання ОЗ за числом обумовленості і отримав достатню оцінку, а також запропонував методи нормалізації і оптимізації матриць коефіцієнтів ОЗ і обґрунтував застосування статистичних методів для підвищення стійкості розв'язків ОЗ. Він показав, що збільшення кількості вимірювань параметрів МС і осереднення їх значень при розрахунках фактично еквівалентно застосуванню методу найменших квадратів для перевизначених систем. Дисертант звертає увагу на те, що такий метод підвищення стійкості є зручним для дослідника, а у разі недостатньої його ефективності пропонує застосовувати відомий у прикладній статистиці метод головних компонент для фільтрації оцінок найменших квадратів. Таким чином показано, що задачі, розв'язки яких є абсолютно ненадійними внаслідок нестійкості, можуть бути розв'язані з задовільною точністю. Розроблені методи можуть знайти своє застосування не лише для розв'язання задач динаміки і міцності, але і багатьох інших ОЗ, наприклад у теплотехніці.

У третьому розділі автор провів дослідження динаміки газотурбінного двигуна (ГТД) і турбонасосного агрегата (ТНА) і застосував розроблені ним методи для зниження їх вібрацій. Здобувач продемонстрував ефективність розроблених ним методів, застосовуючи в комплексі як методи ідентифікації динамічних характеристик, так і статистичні методи підвищення стійкості одержаних розв'язків. Автор довів, що без їх застосування ідентифікація проводилась би з недопустимими похибками, а значення ідентифікованих ексцентриситетів і жорсткостей були б хибними. Необхідно відмітити, що для цього здобувач провів ідентифікацію ексцентриситетів ротора десятиступінчатого компресора ГТД за вимірними коефіцієнтами впливу і динамічними прогинами з використанням одно-, п'яти- і десятимасових моделей. Цим він переконливо довів, що навіть спрощені моделі динаміки можуть давати результати з задовільною точністю, якщо у них підставляють «точні», приведені до моделі ідентифіковані значення пружно-інерційних характеристик. Продемонстровано ефективність застосування методу найменших квадратів та його

фільтрованих (усічених) оцінок для визначення ексцентриситетів окремих дисків компресора з задовільною точністю, що дозволило провести балансування і знизити вібрації компресора. Дисертант застосував розроблений метод пробних параметрів і розв'язав задачу ідентифікації АЧХ, записаної у характерних точках ГТД, ідентифікувавши реальні жорсткості опор з залученням пробних режимів роботи з пружним кільцем. Аналіз коливальної системи ротора компресора з приєднаними масами лобового картера і камери згорання з врахуванням ідентифікованих жорсткостей дав змогу ідентифікувати всі резонанси коливальної системи жорсткого і гнучкого ротора на податливих опорах.

Здобувач вперше звернув увагу на багатомодальність імовірнісних розподілів значень експлуатаційних дисбалансів партії компресорів і розробив метод обробки емпіричних даних вимірювань параметрів МС. Метод дає змогу суттєво підвищити точність обробки значень розподілу з полімодальним характером, і відповідно, підвищити адекватність моделей і ефективність зниження вібрацій.

У розділі представлені результати дослідження ТНА за допомогою розробленої моделі, що базується на інтегро-диференційних залежностях теорії згину. Доведена необхідність динамічного балансування ротора ТНА на робочих частотах. В процесі ідентифікації здобувач приділив увагу масштабуванню і оптимізації коефіцієнтів систем рівнянь для досягнення оптимальної точності розрахунку динамічних характеристик ротора за значеннями прогинів ротора, виміряних на чотирьох некритичних частотах. В якості основного методу розв'язання застосовано метод максимаьної правдоподібності. Це дало можливість значно підвищити точність визначення динамічних характеристик. Критерієм точності при цьому було співпадіння розрахованих за ідентифікованими значеннями критичних частот і значеннями, виміряними на практиці. Наступне динамічне балансування з використанням ідентифікованих значень дозволило суттєво підвищити якість балансування ротора.

Четвертий розділ автор присвятив застосуванню розроблених методів для оцінювання і забезпечення міцності керамічних електронних виробів, герметизованих компаундом, що експлуатуються у пристроях керування ракетами класу «повітря-повітря». Для вирішення проблеми міцності, яка полягала у руйнуванні конструкцій при перепадах температури через значний розкид фізико-механічних характеристик компаунда і кераміки, здобувач розробив метод параметричного синтезу допустимих параметрів шляхом розв'язання оптимізаційної ОЗ. Автор приділив увагу параметричній ідентифікації моделей міцності, і вперше, на основі методу пробних параметрів, розробив розрахунково-експериментальний метод і засіб визначення фізико-механічних характеристик матеріалів при від'ємних температурах до -60°C , у пружно-деформованому стані, близькому до експлуатаційного. Поряд з розв'язанням ОЗ для підтвердження достовірності отриманих результатів автор використовував і сучасні комп'ютерні методи скінченно-елементного аналізу пружно-деформованого стану конструкцій. Параметри моделі досліджуваної конструкції за допомогою розроблених методів були оптимізовані за критерієм міцності. Дотримання при виробництві одержаних оптимальних значень конструкторських параметрів дозволяє гарантувати міцність конструкції.

П'ятий розділ стосується методів ідентифікації параметрів деяких класів нелінійних систем. Автор теоретично розробив метод ідентифікації нелінійних силових характеристик коливальних систем з розподіленими параметрами, що ґрунтується на апроксимації силових чинників, які діють на досліджувану систему, у вигляді лінійної комбінації незалежних функцій із невідомими коефіцієнтами, і приведенні задачі до системи рівнянь. При цьому відомими є експериментально отримані основні характеристики динамічного процесу коливальної системи. Для ідентифікації складних МС здобувач вперше запропонував метод статистично-детермінованого моделювання складних МС, що ґрунтується на методі АПЕ, який за рахунок врахування детермінованих залежностей дозволяє суттєво зменшити витрати часу на моделювання. Метод було застосовано в процесі пошуку оптимальних

значень силових і геометричних параметрів резонатора літакового відповідача, що дозволило не лише обґрунтувати недосконалість існуючої конструкції і необхідність її зміни, але і забезпечити задану вихідну потужність для запропонованої нової конструкції.

У цілому слід констатувати, що на основі розробленого в дисертаційній роботі математичного апарату розв'язання ОЗ ідентифікації і синтезу значень пружно-інерційних, силових, геометричних параметрів і фізико-механічних характеристик, оптимальних для досягнення заданого рівня міцності і віброактивності, вирішена ціла низка актуальних науково-технічних задач, результати яких свідчать про ефективність запропонованих методів.

Публікації та оприлюднення результатів. За матеріалами дисертації здобувачем опубліковані монографія, 22 статті у наукових фахових виданнях України, 16 – у закордонних виданнях, 10 з яких реферуються наукометричними базами; 1 патент на винахід, 11 праць у збірниках тез доповідей міжнародних конференцій. В опублікованих працях в достатній мірі висвітлені наукові положення, основні висновки і рекомендації дисертаційної роботи. Результати дисертації були представлені на багатьох наукових форумах, що свідчить про ознайомлення з ними широкою науковою громадськістю.

Основні зауваження по роботі.

1. Автор згадує прізвища відомих фахівців, що працювали над вирішенням поставленої проблеми, але називає мало закордонних вчених як з динаміки, так і з теорії обернених задач.

2. У реальних механічних системах коливання відбуваються не у площині, а у просторі. Проте автор при розробці математичних моделей коливань (див. розділ 2), як видно зі схем коливання роторів, обмежився лише плоским випадком, що дещо звужує всебічність аналізу.

3. На жаль, автор не показав практичне застосування методів ідентифікації нелінійних силових характеристик коливальних систем.

4. Бажано було б у висновках до роботи більше уваги приділити формулюванню конкретних рекомендацій щодо застосування отриманих результатів при розв'язанні обернених задач.

5. Значна кількість джерел інформації, на які автор дає посилання, не мають відношення до динаміки і міцності, а сосуються прикладної і обчислювальної математики.

6. Чому дорівнюють або від чого залежать показники ступеня m і n у формулі (1.2) ?

7. Потребує пояснення, що таке «статичне балансування у динамічному режимі».

8. Треба навести приклади, де детерміновані моделі використовуються при проектуванні.

9. Яким чином «покращення обумовленості систем рівнянь» обумовлює виконання критеріїв працездатності ?

10. У тексті автореферату і дисертації зустрічаються окремі неточності: описки, граматичні помилки, але в цілому це ніяк не знижує добротності і цінності роботи.

Загальний висновок.

Результати всебічного розгляду та аналізу дисертаційної роботи «Методи оцінювання конструкційної міцності і зниження вібрацій механічних систем на основі обернених задач» дозволяють зробити висновок, що вона є завершеним науковим дослідженням, яке виконане на актуальну тему. Значимість роботи для науки полягає в тому, що розроблені у ній методи оцінювання міцності і зниження вібрацій, які ґрунтуються на методах розв'язання прямих і обернених задач класу інтерпретації даних вимірювань, а також класу параметричного синтезу можна розглядати як наукове підґрунтя для проведення подальших науково-дослідних робіт з динаміки та міцності машин зі швидкісними роторами або недостатньо вивченими фізико-механічними характеристиками. Зазначені вище зауваження слід розглядати як побажання для подальшої плідної наукової праці, і вони не знижують загальної позитивної оцінки роботи. Дослідження за тематикою дисертаційної роботи

доцільно продовжити у Хмельницькому національному університеті в співдружності з відповідними науковими установами НАН України та іншими зацікавленими організаціями, а результати роботи можна рекомендувати для використання на підприємствах машинобудування та інших галузях економіки України, а також при проведенні науково-дослідних робіт у відповідних проектно-конструкторських установах та організаціях. У цілому, розглянута дисертаційна робота задовольняє вимоги п. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор, Горошко Андрій Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент,
директор Інституту машинобудування
Одеського національного політехнічного університету,
Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор,

Вчений секретар університету



Дашенко О. Ф.

Шевчук В. І.