

До спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.06 при Національному
університеті «Львівська політехніка»
079013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

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

1. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі основ проектування факультету інженерної механіки Хмельницького національного університету (ХНУ) Міністерства освіти і науки України.

Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг роботи становить 430 сторінок, у тому числі 333 сторінки основного тексту, 314 найменувань списку використаних джерел.

На розгляд представлено дисертацію, автореферат дисертації, копії опублікованих робіт, автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата наук.

2. Оцінка актуальності теми дисертації.

У роботі вирішується важлива науково-технічна проблема, що має вагомое значення для розвитку динаміки і міцності машин і полягає у зниженні вібрацій і оцінюванні міцності складних механічних систем методами, які ґрунтуються на розв'язанні обернених задач (ОЗ) динаміки і міцності.

Технічна актуальність проблеми полягає у тому, що оскільки більшість роторів сучасних турбомашин і потужного електрообладнання баланують з урахуванням їх гнучкості під час експлуатації на робочих швидкостях у трьох і більше площинах корекції, прагнучи спочатку виявити, а потім компенсувати дисбаланси, які розподілені по довжині ротора, початковим етапом балансування має бути визначення дисбалансу. Однак, величину дисбалансу можна визначити лише опосередковано за результатами вимірювань інших,

пов'язаних з ним величин. Звідси випливає, що єдиним способом визначення дисбалансів гнучкого ротора є їх ідентифікація. Аналогічно, проектний розрахунок на міцність МС має відбуватись за уточненими математичними моделями, параметри яких мають бути ідентифіковані з реальних умов функціонування МС. Тому актуально підвищувати ефективність розрахунків на міцність і віброактивність МС шляхом розвитку методів розв'язання ОЗ ідентифікації.

Наукова актуальність проблеми полягає у необхідності розробки нових і вдосконалення існуючих методів розрахунку на міцність і віброактивність складних механічних систем за рахунок комплексних підходів до розв'язання відповідних ОЗ ідентифікації, які б включали методи підвищення стійкості ідентифікації пружно-інерційних та дисипативних характеристик МС, методи статистичної обробки вимірних даних з полімодальним характером, параметричний синтез за критерієм міцності тощо.

Робота виконувалась у відповідності до наукової тематики і в рамках держбюджетних тем кафедри основ проектування ХНУ.

3. Оцінка наукових результатів дисертації.

Вирішення поставлених завдань дисертаційної роботи виконане на основі нових наукових положень.

3.1. Подальшого розвитку набула теорія захисту машин від вібрацій за рахунок встановлення найменш і найбільш «стійких» ділянок частот обертання ротора та підвищення точності ідентифікації динамічних характеристик швидкісних роторів, що дає змогу мінімізувати похибку ідентифікації дисбалансів і пружно-інерційних характеристик роторів за вимірними динамічними прогинами і коефіцієнтів впливу.

3.2. Вперше розроблено метод ідентифікації параметрів математичних моделей динаміки і міцності МС, що враховує ступінь їх ідеалізації і умови експлуатації, який на відміну від існуючих, полягає у залученні пробних параметрів (режимів), що дозволяє підвищити ефективність моделювання і точність розрахунків за рахунок доозначення ОЗ.

3.3. Розроблено метод експериментального дослідження міцності машин, що полягає у апроксимації емпіричної полімодальної щільності розподілу ймовірностей сумішшю унімодальних законів, обґрунтованому виборі кроку побудови гістограм розподілів і методах призначення допустимих значень

вимірних параметрів, що дозволяє одержувати точніші значення вимірних параметрів з гарантованою надійністю; та розрахунково-експериментальний метод визначення ФМХ матеріалів, який відрізняється тим, що сполучну конструкцію з досліджуваного зразка матеріалу і зразка із пробного матеріалу нагрівають (охолоджують) з одночасною реєстрацією виниклих деформацій, що дає змогу визначати шукані характеристики при від'ємних температурах у пружнодеформованому стані, максимально наближеному до експлуатаційного.

3.4. Вперше розроблено метод побудови гібридних статистично-детермінованих моделей МС з урахуванням детермінованих залежностей параметрів окремих підсистем при плануванні експерименту, що дозволяє в $\prod_{i=1}^k 2^{l_i} / \sum_{i=1}^k 2^{l_i}$ разів зменшити обсяг необхідних експериментів, де l_i - кількість факторів впливу у i -й підсистемі МС.

3.5. Розроблено метод ідентифікації нелінійних силових характеристик коливальних систем із зосередженими масами та розподіленими параметрами, сутність новизни якого полягає у представленні силових чинників, які діють на досліджувану систему у вигляді лінійної комбінації незалежних функцій із невідомими коефіцієнтами; аналітичному розв'язанні прямої задачі нелінійних коливань; зіставленні експериментально отриманих основних характеристик динамічного процесу коливальної системи із отриманим аналітичним розв'язком математичної моделі і розв'язанні систем лінійних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів.

4. Оцінка практичного значення результатів роботи.

Застосування розроблених методів розв'язання ОЗ дало змогу з необхідною точністю ідентифікувати дисбаланси окремих дисків ротора багатоступінчатого компресора ГТД за вимірними значеннями податливостей ротора і динамічними прогинами; ідентифікувати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) ротора і обґрунтувати причини появи всіх резонансних піків; знайти усі форми коливань для цього ротора на податливих опорах. Це, у свою чергу, дало змогу шляхом балансування у 2,5 рази зменшити прогини валу компресора. Статистична обробка даних вимірювань дисбалансів з полімодальним розподілом дала змогу встановлювати із заданою надійністю допустимі значення залишкових дисбалансів партії компресорів. Іде-

нтифіковано жорсткості і маси, приведені до прийнятої динамічної моделі ТНА, що дало змогу за виміряним прогинами відбалансувати гнучкий ротор на робочій частоті обертання у трьох площинах корекції, знизивши вібрації у 6 разів, амплітуди вібрацій опор – у 4 рази, статичні напруження в матеріалі валу – у 3,5 рази, а динамічні – у 3 рази. Визначено ФМХ компаунда і кераміки в напруженому стані, наближеному до експлуатаційного, при температурі від –60 до –20°C. Метод захищено патентом України. Його застосування дало змогу підвищити ефективність математичних моделей міцності. Знайдено оптимальні значення конструктивних параметрів конструкції «керамічний елемент-компаунд», що дало змогу підвищити міцність нових виробів.

Застосування методу статистично-детермінованого моделювання з наступним синтезом допусків на конструкторські параметри, дало змогу в 13 разів скоротити кількість еспериментів за методом ПФЕ на моделювання потужності літакового відповідача, обґрунтувати необхідність зміни конструкції його резонатора, модифікувати конструкцію і знайти оптимальні значення силових та геометричних параметрів МС відповідача, чим забезпечено збільшення рівня працездатності ЛВ на майже 25%. Результати наукових досліджень у вигляді методик і рекомендацій впроваджені на підприємствах та у навчальному процесі у лекційному курсі і при виконанні лабораторних робіт з дисциплін «Основи теорії коливань та віброзахист» та «Основи наукових досліджень, теорія і практика експерименту» у ХНУ.

5. Достовірність і обґрунтованість наукових результатів, положень і оцінка висновків.

Основні наукові положення, що сформульовані та наведені автором у дисертації, підтверджені теоретичним обґрунтуванням та результатами експериментів. Вони одержані з використанням теорії згину, методів аналізу лінійної алгебри і теорії матриць, методів планування експерименту, умовної нелінійної оптимізації, методів математичної і прикладної статистики, доповнюють їх за рахунок комплексного використання разом з сучасними досягненнями обчислювальних методів та систем аналізу.

Достовірність отриманих результатів підтверджується експериментальними дослідженнями, використанням сучасної реєструвальної апаратури тощо. Теоретичні положення та практичні рекомендації добре узгоджуються між собою.

Висновки та їх аргументація є коректними і обґрунтованими. Наукові положення роботи викладені послідовно і логічно. У загальних висновках змістовно і повно охарактеризовано найбільш значимі результати роботи та її практичне значення.

Робота має апробацію на міжнародних конференціях. У повному обсязі вона доповідалась на розширеному науковому міжкафедральному семінарі з машинознавства на базі кафедри фізики і електротехніки, на семінарах у НУ «Львівська політехніка» та у ІПМаш ім. А.М. Подгорного НАН України.

Нові наукові результати та положення повністю відображені у 53 роботах, а саме: 1 монографії; 22 статтях у фахових наукових виданнях України, 18 статтях у наукових виданнях іноземних держав; патенті на винахід, 11 тезах доповідей у збірниках міжнародних конференцій. Зокрема, 11 робіт опубліковані одноосібно, а 10 – у наукових виданнях, що входять у наукометричні бази Web of science та Scopus.

Кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають особистий внесок автора і відповідають вимогам, що висувуються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук.

6. Оцінка змісту, оформлення дисертації та автореферату.

Дисертація Горошка А. В. є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв'язана важлива науково-технічна проблема, що має вагоме значення для розвитку динаміки і міцності машин. На базі розроблених методів ідентифікації динамічних і конструкторських характеристик механічних систем удосконалено методи зниження вібрацій і оцінювання міцності, що підвищує їх працездатність і ресурс. Науково-технічна проблема поставлена коректно.

В дисертації послідовно розглянуто окремі складові проблеми та розроблено засоби для їх вирішення.

У *першому* розділі автор детально розглядає сучасні методи зниження вібрацій швидкісних роторів, розкриває зміст прямої і оберненої задачі динаміки. На прикладі задач зі зниження вібрацій роторів і підвищення міцності конструкцій електронної техніки, виготовленої із матеріалів з недостатньо вивченими характеристиками, дисертант обґрунтував, що для вирішення проблеми шукані параметри механічних систем слід знаходити розв'язанням обернених задач класу інтерпретації даних вимірювань і синтезу, розробивши єдині математичні підходи.

У *другому* розділі автор заглиблюється у теорію розв'язання обернених задач і показує, що можлива похибка розв'язку лінійної дискретної ОЗ може значно перевищувати похибку вимірних значень параметрів машини, причому, досліднику невідомо, якою вона є насправді, оскільки оцінюється лише «зверху». Натомість автор довів, що традиційна похибка за числом обумовленості є недостатньою для оцінювання точності шуканих параметрів. Дисертант запропонував достатню оцінку точності, що враховує дисперсію вхідних даних задачі. Автор переконливо доводить необхідність статистичної регуляризації і обґрунтовує, що застосовуючи ці напрацювання з загальної теорії розв'язання ОЗ, можна суттєво підвищити точність ідентифікованих значень параметрів. Для розв'язання задач з «дуже» погано обумовленими матрицями запропоновано застосовувати лінійну фільтрацію ОНК з застосуванням методу головних компонент. Здобувач вказує на можливість практичного використання отриманих результатів, а саме зв'язок між бажаною похибкою шуканих значень і потрібною точністю вимірювальної апаратури (наприклад, для вимірювання прогинів ротора) а також складністю математичної моделі коливальної системи.

Третій розділ автор присвятив застосуванню отриманих у *другому* розділі методів параметричної ідентифікації гнучких роторів і методів підвищення точності розв'язання ОЗ для ідентифікації динамічних параметрів роторів компресора і турбонасосного агрегату. Автор демонструє, що розроблені ним методи дозволяють ідентифікувати з необхідною точністю як пружні і масові характеристики, так і ексцентриситети роторів, завдяки чому вдалося суттєво знизити їх вібрації.

Автор вперше розглядає дисбаланси як випадкові величини, які не підкоряються одномодальним законам розподілу ймовірностей, і показує, як можна обробляти такі статистичні дані. Слід зазначити, що отримані результати можуть бути використані і в інших галузях, наприклад автор успішно використав їх для обробки емпіричних значень міцнісних характеристик кераміки резисторів в задачі забезпечення міцності герметизованої керамічної конструкції «резистор-компаунд». Кожного разу, знаходячи нові теоретичні розв'язки ОЗ, дисертант знаходить їм практичне застосування в задачах динаміки і міцності. Автор розробив метод параметричної ідентифікації математичних моделей динаміки і міцності МС, що враховує ступінь їх ідеалізації та умови експлуатації, який полягає у залученні пробних параметрів

або режимів, що дає можливість підвищити ефективність моделювання і точність розрахунків за рахунок доозначення ОЗ. За допомогою цього методу автор зумів визначити ФМХ матеріалів зі значним розкидом реальних значень і знайдено реальні пружно-інерційні характеристики ротора багатоступінчатого компресора ГТД, що дозволило ідентифікувати АЧХ двигуна.

В *четвертому* розділі дисертант одержав низку наукових і практичних результатів щодо застосування розроблених методів розв'язання ОЗ ідентифікації в задачах міцності. Зокрема, дисертант розробив розрахунково-експериментальний метод і засіб ідентифікації ФМХ конструкційних матеріалів. Автор, на відміну від інших відомих методів ідентифікації, запропонував нагрівати (охолоджувати) з одночасною реєстрацією виниклих деформацій сполучну конструкцію з досліджуваного зразка матеріалу і зразка із пробного матеріалу з добре відомими характеристиками, що дозволяє визначати ФМХ при від'ємних температурах в експлуатаційному пружнодеформованому стані. Таким чином дисертант знайшов значення модуля пружності, коефіцієнта Пуассона і коефіцієнта лінійного температурного розширення компаунду за від'ємних температур від -60°C до -20°C , за яких вони були невідомими, що дало можливість ідентифікувати параметри моделі міцності компаундованих керамічних конструкцій, підвищивши таким чином їх адекватність, а отже і точність одержаних за ними розв'язків.

Дисертант, ґрунтуючись на розроблених методах, запропонував загальний підхід до розв'язання задач проектувального розрахунку на міцність. Умова міцності, ТУ та інші умови щодо вхідних і вихідних параметрів математичної моделі, які описує міцність конструкції, є обмеженнями у оберненій оптимізаційній задачі параметричного синтезу. Автор зумів обґрунтувати критерій оптимальності цієї задачі – це максимальні допуски на значення вхідних параметрів моделі. Завдяки застосуванню цього методу вдалося оцінити і забезпечити міцність герметизованої керамічної конструкції.

Автор у *п'ятому* розділі розробив метод ідентифікації нелінійних силових характеристик коливальних систем із зосередженими масами та розподіленими параметрами, що зводиться до розв'язання систем лінійних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів. Вперше розроблено і застосовано метод побудови гібридних статистично-детермінованих моделей структурно-

складних МС, що на відміну від відомих враховує детерміновані залежності параметрів окремих підсистем при плануванні експерименту, що дозволило отримати математичну модель формування потужності літакового відповідача, обґрунтувати необхідність зміни конструкції на безконтактну і знайти допустимі значення силових і геометричних параметрів конструкції, які забезпечують заданий рівень потужності, причому кількість експериментів для ПФЕ знизилась у 13 разів.

Отже, на основі розгляду матеріалів дисертації можна зробити позитивний висновок про повноту розробки поставленої науково-технічної проблеми.

Дисертація оформлена у відповідності до вимог ДСТУ, добре ілюстрована, стиль та послідовність викладення матеріалу відповідають вимогам до написання наукових робіт. У тексті дисертації є посилання автора на свої роботи.

Наукові положення дисертації, що складають наукову новизну і виносяться на захист, не повторюють цих положень у дисертаціях кандидата технічних наук здобувача.

Автореферат в достатній мірі відображає зміст дисертації, а наукові положення та результати, що наведені в ньому, ідентичні викладеним у дисертаційній роботі.

7. Основні зауваження.

7.1. Бажано більш чітко і стисло сформулювати наукову новизну роботи, підтвердити новизну більшою кількістю патентів та інших об'єктивних матеріалів, що впливають із суті роботи.

7.2. Автору слід на початку дисертаційної роботи та у рефераті пояснити різницю між оберненими за Адамаром задачами математичної фізики та оберненими задачами динаміки і міцності в класичному розумінні. Наприклад, класична обернена задача динаміки, яка полягає у пошуку траєкторії руху за відомими силами є за класифікацією некоректно поставлених задач прямою, а пряма задача динаміки (визначення сил за траєкторією руху) – оберненою.

7.3. В дисертаційній роботі одержано результати щодо ідентифікації АЧХ двигуна, пояснено причини всіх резонансів. Разом з тим, автор не наводить конкретних рекомендацій щодо вдосконалення конструкції компресора двигуна, які впливають із суті проведених досліджень.

7.4. Потребує пояснення, яким чином забезпечена працездатність розв'язанням обернених задач. Бажано більш детально підтвердити достовірність одержаних результатів. При обґрунтуванні припущень, використаних при побудові математичних моделей з зосередженими масами для опису динаміки гнучких роторів не вказано, чому не враховано похибку вимірювань коефіцієнтів впливу.

7.5. Автор пропонує методи постановки і розв'язання обернених задач, але не вказує обмеження, які накладаються на клас їх коректності. Які розв'язки можна вважати стійкими, а які ні ?

7.6. В огляді не наведені прізвища видатних вчених-динаміків в області методів зрівноваження гнучких роторів, таких як W. Kellenberger, A. Meldal, R. E. Bishop та ін. Тому не зрозуміло, чи знайомий автор з їх працями і чи враховував їх напрацювання у свої дисертаційні роботі.

7.7. В роботі є окремі термінологічні неточності, зокрема вжито терміни «параметри» і «характеристики». Потребує роз'яснення, в чому полягає їх різниця, якщо вона є. В дисертації та авторефераті є багато скорочень, які можна опускати, що поліпшить сприйняття роботи.

Вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

8. Загальна оцінка роботи.

Дисертація Горошка А.В. є завершеною науково-дослідною роботою, результати застосування якої дозволяють підвищити ефективність зрівноваження та оцінювання конструкційної міцності складних механічних систем шляхом ідентифікації їх параметрів методами ОЗ динаміки і міцності. Проблема, що вирішена у роботі, є актуальною для галузі динаміки і міцності машин на сучасному етапі її розвитку.

Дисертаційна робота виконана на високому науково-технічному рівні, має наукову та практичну цінність. Результати роботи впроваджені у виробництво та в навчальний процес.

Таким чином, за змістом і обсягом дисертація «Методи оцінювання конструкційної міцності і зниження вібрацій механічних систем на основі обернених задач» відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор – Горошко Андрій Володимирович заслуговує

присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри конструювання верстатів і машин
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор



В. Б.Струтинський

Підпис д.т.н., проф. Струтинського В.Б. засвідчую
Вчений секретар
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



А.А.Мельниченко