

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 дисертації . Стратегія розвитку машинобудівного комплексу України передбачає підвищення конкурентної спроможності машин вітчизняного виробництва у порівнянні зі світовими їх аналогами. Поряд з цим тенденція отримання більших потужностей у менших габаритах викликає появу у різних галузях техніки машин з гнучкими роторами, які потребують ефективних методів боротьби із вібраціями зумовлених їх деформаціями, дисбалансами та ін. Відшукання дисбалансів ротора у робочих режимах можливе лише на базі ідентифікації її характеристик із реальної машини з залученням даних вимірювань. Ефективність забезпечення міцності механічних систем (МС), в конструкції яких використовуються нові матеріали з недостатньо вивченими властивостями (композити і полімери), що контактують між собою, залежить від розкиду значень їх фізико-механічних характеристик (ФХМ). Уточнені значення характеристик, які гарантують виконання умов міцності, можуть бути знайдені методами обернених задач (ОЗ). Тому перспективним напрямком досліджень для вирішення зазначених проблем є розроблення методів ідентифікації параметрів МС, оптимальних для досягнення заданого рівня міцності і віброактивності. У сукупності із сучасними комп'ютерними методами аналізу вони дозволяють підвищити ефективність забезпечення міцності машин та їх зрівноваження. Хоча на сьогодні теорія ОЗ є відносно розвинутою, окремі питання її використання на практиці потребують вдосконалення. Це стосується задач ідентифікації

динамічних характеристик та обернених оптимізаційних задач параметричного синтезу, які у математичній постановці (для більшості випадків) належать до класу некоректних. Основна суперечність полягає у прагненні до урахування все більшої кількості параметрів і характеристик МС, а від так - ускладненні моделі, забезпеченні достатньої точності моделювання і розв'язання досліджуваних типів задач міцності і динаміки.

Беручи до уваги викладене, тему дисертації Горошка А.В. слід вважати актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи А. В. Горошка забезпечено чітким формулюванням проблеми, шляхів її вирішення та комплексним підходом при її розв'язанні, зокрема, органічним поєднанням розрахункових методів, методів математичного моделювання та експериментальних досліджень.

В цілому наукові положення і висновки, сформульовані у дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими та підтвердженими дослідним випробуваннями, практичним впровадженням на підприємствах.

Достовірність отриманих у роботі результатів. Достовірність наукових положень дисертації не викликає сумніву, оскільки основні теоретичні положення підтверджуються результатами великого обсягу експериментальних досліджень. Зокрема:

- експериментальним дослідженням динаміки компресора газотурбінного двигуна і ротора турбонасосного агрегату доведено достовірність запропонованих моделей динамічних процесів та правомірність прийнятих припущень;

- випробуваннями герметизованих конструкцій «керамічний елемент-компаунд» підтверджено відповідність отриманих результатів ідентифікації і синтезу конструктивних параметрів реальним умовам.

Отримані в роботі результати обговорені на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Наукова новизна отриманих в роботі результатів. У роботі отримано низку важливих наукових результатів, які стосуються розвитку методів розрахунку конструкційної міцності і зниження вібрацій машин:

- подальшого розвитку набула теорія захисту машин від вібрацій за рахунок підвищення точності ідентифікації дисбалансів і пружно-інерційних характеристик швидкісних роторів;

- отримано достатню умову оцінки величини похибки і розроблено метод оптимізації коефіцієнтів лінійних дискретних ОЗ, застосовано лінійну фільтрацію оцінок найменших квадратів для підвищення стійкості розв'язків ідентифікації дисбалансів і пружно-інерційних характеристик гнучких багатомасових роторів;

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

- досліджено динамічні процеси у швидкісних гнучких роторах з зосередженими масами і науково обґрунтовано вибір найменш і найбільш «стійких» ділянок частот обертання ротора шляхом врахування обумовленості матриці його коефіцієнтів впливу, що дозволяє мінімізувати похибку ідентифікації дисбалансів за вимірними динамічними прогинами і коефіцієнтами впливу;

- розвинуто методи експериментального дослідження міцності машин: розроблено метод обробки полімодальних емпіричних значень зі щільністю розподілу ймовірностей. Вони збільшують адекватність моделей і підвищують точність визначення вимірних параметрів з гарантованою надійністю;

- розроблено 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;

- вперше розроблено метод побудови гібридних статистично-детермінованих моделей МС з урахуванням детермінованих залежностей параметрів окремих підсистем при плануванні експерименту. Це дозволяє значною мірою зменшити обсяг необхідних експериментів.

- розроблено метод ідентифікації нелінійних силових характеристик коливальних систем із зосередженими масами та розподіленими параметрами, сутність новизни якого полягає у: а) представленні силових чинників, які діють на досліджувану систему у вигляді лінійної комбінації незалежних функцій із невідомими коефіцієнтами; б) аналітичному розв'язанні прямої задачі нелінійних коливань; в) 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.

Значення отриманих у роботі результатів. Наукове значення дисертаційної роботи полягає у розробленні:

- методів підвищення ефективності зниження вібрацій гнучких роторів за допомогою розв'язання ОЗ ідентифікації їх динамічних параметрів;

- обґрунтуванні зв'язку точності ідентифікації, динамічної моделі та частот обертання, на яких проводяться вимірювання динамічних характеристик;

- підвищенні адекватності розрахункових моделей динаміки і міцності шляхом ідентифікації їх параметрів з застосуванням статистичної обробки полімодальних сумішей і методу пробних параметрів (режимів) МС;

- підвищенні точності розв'язання ОЗ.

Практичну цінність дисертаційної роботи становлять методики, алгоритми та практичні рекомендації зі зниження вібрацій МС з гнучкими

роторами і забезпечення міцності герметизованих конструкцій електронної техніки.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що вони дають можливість підвищити ефективність оцінювання зрівноваженості і міцності складних МС, знизити вібрації та навантаження, а отже підвищити надійність і довговічність досліджуваних МС.

1. Ідентифіковано дисбаланси окремих дисків ротора багатоступінчатого компресора ГТД за вимірними значеннями податливостей ротора і динамічними прогинами.

2. Ідентифіковано АЧХ ротора і обґрунтовано причини появи всіх резонансних піків; знайдені усі форми коливань для цього ротора на податливих опорах. Це 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.

3. Ідентифіковано жорсткості і маси, приведені до прийнятої динамічної моделі ТНА, що дало змогу 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.

4. Визначено ФМХ компаунда і кераміки в напруженому стані, наближеному до експлуатаційного, при температурі від -60 до -20°C . Статистична обробка значень вимірних міцнісних характеристик кераміки з полімодальним розподілом імовірностей дала змогу підвищити ефективність математичних моделей.

5. Знайдено оптимальні значення конструктивних параметрів конструкції «керамічний елемент-компаунд», що дало змогу підвищити міцність нових виробів.

6. Застосування методу гібридного моделювання з наступним синтезом допусків на конструкторські параметри, дало змогу значно скоротити витрати

часу на моделювання потужності літакового відповідача (ЛВ), обґрунтувати необхідність зміни конструкції його резонатора, модифікувати конструкцію і знайти оптимальні значення конструкторських параметрів МС ЛВ, чим забезпечено збільшення рівня його працездатності на 24%.

Результати досліджень у вигляді методик впроваджено у: ТДВ «АДВІС»; ТОВ «НЕЙЛ» (м. Хмельницький); та у навчальному процесі ХНУ на кафедрі галузевого машинобудування та агроінженерії при викладанні дисциплін «Основи теорії коливань та віброзахист» та «Основи наукових досліджень, теорія і практика експерименту».

Повнота викладення здобувачем основних результатів

За темою дисертаційної роботи здобувач опублікував 53 наукових праці: 1 монографія у співавторстві, 22 статті у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України для опублікування результатів досліджень, 18 статей у закордонних наукових виданнях, з яких 10 реферуються наукометричними базами Web of science та Scopus, 1 патент України, 11 праць у матеріалах Міжнародних наукових, науково-практичних конференцій.

Оцінка оформлення дисертації й автореферату. Дисертація написана державною мовою. Виклад матеріалу в роботі чіткий та послідовний. Розділи роботи взаємопов'язані та цілком розкривають поставлену проблему. Тема і зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Оформлення як дисертаційної роботи, так і автореферату в цілому відповідає вимогам ДАК України.

Структура та зміст роботи. В цілому дисертація є завершеним науковим дослідженням, побудована за класичною схемою, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 431 сторінку, з обсягом основного тексту 335 сторінок. Дисертація містить 80 рисунків, 38 таблиць, список використаних джерел із 314 найменувань на 32 сторінках і 4 додатки на 32 сторінках.

У вступі дисертант обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано на низку питань теоретичного і прикладного плану, що вимагають вирішення,

на основі чого сформульовано наукову проблему, мету і напрямки досліджень. Охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність, показано взаємозв'язок розв'язуваних завдань з науковими програмами. Надано відомості про публікації і апробацію роботи.

У першому розділі на основі аналізу наукових публікацій за темою дисертації розкрито проблему міцності і віброактивності складних механічних систем на прикладі роторних систем і керамічних конструкцій, герметизованих компаундом.

В результаті аналізу існуючих методів ідентифікації динамічних характеристик, ФХМ і методів розрахунку допустимих значень параметрів на основі оптимізаційних ОЗ синтезу, здобувач обґрунтував напрями вдосконалення методів шляхом розробки нових статистичних підходів до ідентифікації і підвищення стійкості розв'язків таких задач.

Другий розділ автор присвятив питанням розвитку теорії обернених задач ідентифікації динамічних характеристик швидкісних роторів. Розглянуто вплив числа обумовленості на точність розв'язання лінійних дискретних обернених задач і розроблено статистичні методи підвищення їх стійкості. Здобувач зосередив свою увагу на питаннях точності результатів ідентифікації і довів, що збільшенням кількості вимірювань із відповідною статистичною обробкою можна значно підвищити точність шуканих значень, а значить забезпечити адекватність математичних моделей динаміки і міцності.

Шляхом аналізу існуючих методів балансування і оцінювання міцності машин з пружно деформівними роторами і електронних виробів зроблено висновки про принципову можливість підвищення ефективності розглянутих методів за рахунок залучення методів постановки і розв'язання ОЗ ідентифікації.

Виходячи з загального підходу до розв'язання лінійних дискретних ОЗ, автор сформулював задачі ідентифікації параметрів гнучких роторів з використанням статичних і динамічних коефіцієнтів впливу і вимірних значень динамічних прогинів ротора. Важливим і необхідним для подальших

досліджень результатом є встановлені співвідношення між точністю ідентифікації, складністю моделі і точністю вимірювальної апаратури, встановлені ділянки «стійких» частот при ідентифікації, а також обґрунтування збільшення кількості вимірювань і застосування методу найменших квадратів та його фільтрованих оцінок.

Автор запропонував і показав доцільність та ефективність представлення розв'язків ОЗ динаміки і міцності у вигляді допусків або меж значень.

У третьому розділі дисертант показав на ефективність розроблених методів, провівши статичні і динамічні дослідження динаміки компресора газотурбінного двигуна і ротора турбонасосного агрегату. У порівнянні із ідентифікацією ексцентриситетів мас ротора для моделі з зосередженими параметрами без статистичної регуляризації результати значно відрізняються від дійсних, і здійснив ідентифікацію для одно-, п'яти- і десяти масових моделей. У розділі продемонстровано ефективність розробленого методу пробних параметрів. Цей метод доозначення ОЗ дозволяє не лише розв'язати важливі прикладні задачі, але й досягти бажаної точності за рахунок залучення більшої кількості вимірювань на пробних режимах, як це здійснив автор з пружним кільцем опори ротора. Декілька резонансів на частотах, менших за критичну частоту коливань ротора, свідчили про те, що врахуванням коливань лише ротора неможливо пояснити походження резонансів, і до коливань залучаються маси лобового картера і камери згорання. Автор зумів поставити і розв'язати ОЗ ідентифікації реальних значень податливостей опор за експериментально отриманою АЧХ. Розв'язанням ж прямої задачі за ідентифікованими податливостями здійснено перевірку отриманих результатів. Треба відзначити, що метод пробних параметрів був застосований автором і для ідентифікації коефіцієнта Пуассона, модуля пружності і коефіцієнта лінійного температурного розширення матеріалів.

Дисертант провів дослідження динаміки турбонасосного агрегату і ідентифікував масові та пружні характеристики коливальної системи за допомогою вимірювань прогинів ротора на чотирьох некритичних частотах

обертання. При цьому автор використав розроблені методи і алгоритми. В цілому отримані результати дали змогу суттєво знизити вібрації ротора і опор, їх реакції.

У четвертому розділі досягнення адекватності математичних моделей і точності розрахунків динаміки та міцності автором вперше запропонований метод ідентифікації ФМХ матеріалів з недостатньо вивченими властивостями, зокрема значним розкидом реальних значень ФМХ. Для цього, ґрунтуючись на теорії міцності сполучних циліндрів Ламе-Гадоліна, було розроблено засіб у вигляді сполучних циліндрів з використанням пробного матеріалу. Уточнені значення увійшли до розрахункової моделі, що описує пружно-деформований стан на контакті двох матеріалів. Для визначення допустимих значень геометричних і фізико-механічних параметрів конструкції, які б гарантували її міцність, здобувач розробив і застосував метод параметричного синтезу на основі обернених оптимізаційних задач. Ґрунтуючись на цих методах, автор забезпечив міцність конструкцій компаундованих резисторів і конденсаторів.

П'ятий розділ автор присвятив розробці методів ідентифікації нелінійних силових характеристик коливальних систем. Базуючись на теорії механічних коливань, автор теоретично довів, що нелінійні силові характеристики коливальних систем з розподіленими і зосередженими параметрами деяких класів можна ідентифікувати шляхом приведення до лінійної дискретної оберненої задачі. Автор розробив метод статистично-детермінованого моделювання механічних систем, який дає змогу суттєво знизити витрати часу на моделювання. Метод був застосований в задачі забезпечення працездатності літакового відповідача. Таким чином здобувач продемонстрував, що розроблений ним метод може бути застосований не лише в задачах оцінювання і забезпечення міцності, а і для вирішення інших проблем технічних систем.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Перший розділ переобтяжений інформацією щодо внеску вчених різних країн у розв'язання проблем, які близькі до розглядуваних у роботі,

однак на внесок Вітчизняних науковців чомусь не звернуто належної уваги (див. роботи Кононенка В.О., Нижника Л. В. та ін.) .

2. Автор по тексту роботи вживає термін «конструкторські параметри», не уточнюючи про які саме параметри йде мова; незрозуміло також, чим автор визначає складність або простоту МС.

3. У роботі не розкрито зміст терміну “статичне балансування у динамічному режимі”. У зв’язку із наведеним залишається невизначеним: що закладено у поняття модуля пружності матеріалу ротора - його статичну чи динамічну величину.

4. З тексту дисертаційної роботи не зовсім зрозуміло:

- яким чином розв’язання задачі оптимізації допусків обумовлює працездатність конструкцій;

- яке реальне втілення у конструкцію опор або технологію їх виготовлення дали результати проведених розрахунків;

- яким чином перевірялась адекватність створеної 3D-моделі реальному об’єкту моделювання.

5. Автор розглядає лише одну властивість некоректності ОЗ – нестійкість розв’язків, чим це зумовлено?

6. В назві роботи фігурує термін “оцінювання конструкційної міцності”, у той же час, у низці розділів, як результат теоретичних та експериментально перевірених досліджень, вже використовується більш важливий із практичної сторони термін “забезпечення міцності ... конструкції”. Тому, назву роботи можна було б дещо уточнити.

7. У роботі зустрічаються окремі невідповідності та неточності, зокрема у “Списку використаних джерел” (п. 172) неточно вказано кількість сторінок.

Зроблені вище зауваження не мають визначального впливу на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам:

1. Дисертація А. В. Горошко “Методи оцінювання конструкційної міцності і зниження вібрацій механічних систем на основі обернених задач” є

завершеною науковою роботою, в якій отримано нові, важливі в науковому і практичному плані результати, які є істотним внеском у вирішення проблеми міцності і зниження вібрацій механічних систем.

2. Робота відповідає вимогам пунктів 9, 10, 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,
завідувач кафедри інженерної механіки
Національної академії сухопутних військ
ім. гетьмана Петра Сагайдачного,
доктор технічних наук, професор,



Б. Сокіл

Підпис д.т.н., проф. Сокола Б.І. з а с в і д ч у ю
Заступник начальника Національної академії сухопутних військ
ім. гетьмана Петра Сагайдачного з навчальної роботи
кандидат військових наук, доцент



О.П. Красюк