



ВІДГУК

офіційного опонента
на дисертаційну роботу Воропая Олексія Валерійовича
«Використання інтегральних рівнянь Вольтерра
у нестационарних задачах динаміки пластин»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Дисертаційна робота присвячена дослідженню нестационарного деформування пластинчастих елементів конструкцій при їх складному навантаженні (декілька поперечних та/або повздовжніх імпульсних навантажень, які діють одночасно) за наявності різноманітних локалізованих особливостей (зосереджених мас, додаткових зосереджених опор, а також погашувачів коливань) з урахуванням дисипації енергії на базі теорії інтегральних рівнянь Вольтерра та згладжувальних лінійних інтегральних операторів.

Метою дисертаційної роботи є розв'язання у загальному вигляді оберненої задачі про одночасну дію на пластину скінченного набору нестационарних довільних навантажень, яка зведена до розв'язку системи інтегральних рівнянь Вольтерра, а також розроблення спеціальних ефективних підходів для урахування дисипації енергії під час деформування.

Актуальність теми. На теперішній час існує можливість проведення розрахунків деформування елементів конструкцій за допомогою існуючих пакетів програм (ANSYS та інші) на базі різних численних методів (насамперед методу скінчених елементів), але майже завжди виникає проблема недостатньої інформації про дію нестационарних навантажень. Рішення питань, що стосуються недостатньої інформації за дії таких навантажень є дуже актуальним.

Ідентифікація невідомих нестационарних навантажень може істотно знизити час і вартість досліджень та частково замінити реальні дослідження обчислювальними експериментами.

Треба підкреслити також важливу роль досліджень з управління коливаннями, які пов'язані з актуальною проблемою активного і пасивного віброзахисту.

Актуальність дисертаційної роботи, яка присвячена розв'язанню обернених нестационарних задач механіки деформівного твердого тіла (визначення законів зміни в часі імпульсних, зокрема ударних, а також керуючих навантажень на базі розв'язання обернених задач), не викликає сумнівів.

Робота виконана згідно з індивідуальним планом підготовки докторанта кафедри вищої математики НТУ «ХПІ» та щорічними планами науково-дослідної роботи кафедри деталей машин і ТММ ХНАДУ з 2005 по 2018 роки, а також з робочими планами бюджетної теми 01-53-04 "Створення методів математичного моделювання з управління нестационарними

деформаційними процесами" (ДР №0104U002046) з 2004 по 2006 роки і теми № 01-53-07 "Математичні основи експрес-аналізу механічних параметрів дорожнього покриття та дослідження його динамічних властивостей" (ДР №0107U001004) з 2007 по 2009 роки.

Загальна характеристика роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи – 359 сторінок, з яких основного тексту – 282 сторінки. Дисертація містить 165 рисунків. Список використаних джерел містить 300 найменувань на 36 сторінках. Додатки – 16 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету і задачі дослідження, зазначено основні наукові результати, наведено відомості про публікації та апробацію основних положень, а також кваліфікаційні ознаки дисертації.

У **першому розділі** здійснено огляд робіт за темою дисертаційної роботи. Огляд літератури складається з п'яти частин і висновку. Перша частина присвячена вибору теорії нестационарного деформування пластин. У другій частині наведено ряд монографій і роботи оглядового характеру, присвячені дослідженню динаміки пластин. У третій частині огляду описані роботи з розв'язання нестационарних задач механіки деформівного твердого тіла, у яких використовуються інтегралі згортки та інтегральні рівняння. У четвертій частині розглянуто задачі, в яких використано інтегральні рівняння Вольтерра для визначення динаміки навантаження. П'ята частина огляду присвячена роботам з ідентифікації та управління коливаннями із застосуванням нових технологій.

У **другому розділі** описано чисельно-аналітичні методи, що використовуються у роботі. Викладено особливості застосування регуляризуючого алгоритму А. М. Тихонова для розв'язання некоректних задач механіки деформівного твердого тіла. Розглянуто скінченновимірну апроксимацію некоректної задачі та згладжувального функціонала Тихонова. Наведено приклад розв'язання тестової некоректної задачі (ідентифікації невідомого нестационарного поперечного навантаження, що діє на прямокутну ізотропну шарнірно-обперту пластину середньої товщини в пружній постановці) з використанням регуляризуючого алгоритму. Приділено увагу питанню вибору значень параметра регуляризації. Розглянуто комплекс методів для розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтерра на основі використання регуляризуючого алгоритму Тихонова в сукупності з узагальненими алгоритмами Крамера та Гаусса для блокових матриць.

У **третьому розділі** розглянуто імпульсні впливи системи довільних складних навантажень (що мають не тільки поперечну, але й поздовжню складову) на прямокутні пружні ізотропні пластини середньої товщини в рамках уточненої теорії С. П. Тимошенка. Наведено методику розв'язання прямих та обернених задач у рамках теорії пружності для нестационарних навантажень пластини. Подано ряд прикладів обчислень з ідентифікації

системи декількох зовнішніх незалежних сил. Крім того, у третьому розділі описана методика урахування впливу двосторонньої пружної інерційної основи при імпульсному деформуванні прямокутних пластин.

У **четвертому розділі** описано нестационарне деформування пластин при наявності різних зосереджених у точці або локалізованих на малих областях особливостей (мас, додаткових опор та погашувачів коливань). У розділі наведена постановка задачі та математична модель, а також розв'язання задачі в загальному вигляді.

У дисертаційній роботі викладено підхід, що дозволяє враховувати вплив ребер і зосереджених особливостей на нестационарне деформування елементів конструкції шляхом введення у вихідні моделі деформування пластин додаткових нестационарних сил (реакцій). Ці невідомі нестационарні навантаження можуть бути визначені з відповідних інтегральних співвідношень шляхом зведення їх до лінійних інтегральних рівнянь Вольтерра або їх систем, що дозволяє отримувати аналітико-чисельні розв'язання без використання ітераційних схем.

У **п'ятому розділі** розв'язано низку задач, які стосуються управління нестационарними коливаннями механічних систем, що містять пластини. Досліджено можливість управління нестационарними коливаннями механічної системи, що складається з пластини та зосередженої маси, за допомогою додаткового керуючого навантаження, функція зміни в часі якого ідентифікується. Розглянуто також подібну задачу в рамках пасивного віброзахисту – гасіння нестационарних коливань механічної системи, що складається з пластини та зосередженої маси, за допомогою введення в систему пасивного погашувача коливань.

На основі запропонованого в роботі комплексу методів розв'язано задачу управління поперечними коливаннями на невеликій області пластини – два варіанти (загальний випадок і особливий випадок, коли точки прикладення керуючих навантажень збігаються з вершинами прямокутника, що обмежує область управління). Також у п'ятому розділі було розглянуто також задачу про можливість активного гасіння нестационарних коливань по всій поверхні прямокутної пластини.

У висновку до розділу зазначено, що у випадку розробки систем гасіння нестационарних коливань для відповідальних конструкцій слід сполучати активні та пасивні схеми віброзахисту.

У **шостому розділі** вказані два підходи, що дозволяють на базі розв'язків, отриманих у рамках теорії пружності, для деформівних елементів конструкції враховувати дисипативні властивості в матеріалі. Зокрема є можливість моделювати внутрішню в'язку та гістерезисне тертя, що описується моделями Кельвіна–Фойхта та Бока–Шліппе–Колара.

Перший підхід базується на використанні диференціальних операторів і зводиться до модифікації аналітичних співвідношень для відповідних ядер інтегралів і частот, які можуть бути знайдені з розв'язку характеристичних рівнянь, записаних для різних моделей тертя.

При другому підході використовуються згладжувальні лінійні інтегральні оператори, і може бути застосований для будь-яких розв'язків у рамках теорії пружності, які подані у вигляді інтегралів Дюамеля типу згортки з ядрами Коші. Згладжувальні інтегральні оператори дозволяють розраховувати ці ядра для змінених коефіцієнтів тертя, а також відновлювати пружну складову розв'язку, збурену внутрішнім тертям. Досліджено алгебраїчні властивості цих операторів. У результаті того, що при розрахунках інтегралів виконується дискретизація, можна скористатися запропонованою в роботі модифікацією ядер відповідно до теореми Ефроса, причому ця модифікація здійснюється шляхом множення вихідних ядер на спеціальним чином отримані матриці.

У **висновках** наведено перелік основних наукових і практичних результатів одержаних у дисертаційній роботі.

У **додатках** наведено список публікацій здобувача, а також копії трьох довідок про використання результатів дисертації.

Наукова новизна результатів роботи. До нових наукових результатів, отриманих в роботі, можна віднести такі:

1. Набула подальший розвиток теорія розв'язку нестационарних обернених задач механіки деформівного твердого тіла.

2. Удосконалено комплекс методів та обчислювальні алгоритми для дискретизації систем інтегральних рівнянь Вольтерра, та розв'язання блокових систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

3. На базі розв'язаної у загальному вигляді нестационарної оберненої задачі для прямокутної пластини та удосконаленого комплексу методів вперше розв'язано:

– обернену задачу про вплив на пластину декількох невідомих незалежних нестационарних навантажень, що діють одночасно;

– обернені задачі моделювання нестационарних коливань прямокутних пластин за наявності додаткових зосереджених особливостей (маси, амортизатора, додаткових опор);

– задачу ідентифікації реакції в'язкопружної опори, яка контактує з пластиною, а також запропоновано та виконано декомпозицію цієї реакції на пружну та в'язку складові, шляхом заміни її двома незалежними в'язкою та лінійно-пружною додатковими опорами.

4. Удосконалено методуку активного управління нестационарними коливаннями прямокутної пластини за допомогою додаткових керуючих навантажень, а саме показано можливість:

а) урахування додаткових зосереджених особливостей;

б) управління коливаннями не в одній точці пластини, а на невеликій області відносно величини площі пластини;

в) гасіння коливань по всій поверхні пластини скінченою системою керуючих навантажень.

5. Побудовано розв'язок низки некоректних задач активного управління нестационарними поперечними коливаннями прямокутної пластини з урахуванням різних зосереджених особливостей, а також

розглянуто схеми пасивного і активного віброзахисту в задачі гасіння коливань пластини з приєднаною масою.

6. Виконано урахування дисипативних властивостей в матеріалі на базі розв'язків у рамках теорії пружності при деформуванні елементів конструкції з використанням згладжувальних лінійних інтегральних операторів, для випадків внутрішнього в'язкого тертя і внутрішнього гістерезисного тертя.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

– вони можуть бути використані при ідентифікації навантажень, які виникають у різних механічних системах під час їх нестационарного деформування на основі непрямих проявів (переміщень, деформацій у деяких точках елементів конструкцій);

– на базі розроблених моделей та розв'язків відповідних обернених задач мається можливість оптимального проектування додаткових в'язкопружних опор для пластинчастих елементів конструкцій;

– запропоновані математичні моделі дозволяють вибрати раціональні схеми управління коливаннями та знаходити залежності керуючих впливів від часу;

– отримані в роботі згладжувальні інтегральні оператори та їх дискретні аналоги дають можливість швидкого перерахунку задач для різних коефіцієнтів дисипації без додаткових ускладнень.

Впровадження матеріалів дисертаційної роботи та запропонованих підходів підтверджено довідками про використання результатів досліджень:

– кафедри вишукувань та проектування автомобільних доріг і аеродромів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету при виконанні науково-дослідної роботи за договором № 66/37-50-12 „Переробити, доповнити та привести у відповідність до сучасних нормативних вимог альбом типових конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу під розрахункові навантаження А1, А2, Б”.

– ТОВ «Океан-судоремонт» при виконанні досліджень ударних навантажень елементів корпусу судів під час швартування.

– Корпорації «Співдружність» при проектуванні пластинчастих елементів броньованих кабін і камер для розбирання і утилізації вибухонебезпечних виробів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується:

– ретельним аналізом математичної стійкості та збіжності отриманих розв'язків;

– зіставленням результатів розв'язання прямих і обернених задач;

– зіставленням із результатами, отриманими при розв'язанні іншими методами або зіставленням із результатами інших авторів;

– зіставленням із результатами теоретико-експериментальних досліджень.

Повнота відображення результатів дисертації, наукових положень та висновків. За матеріалами дисертації опубліковано 51 наукову працю, серед яких одна одноосібна монографія, одна монографія в співавторстві,

29 наукових статей, з них 28 статей у фахових виданнях України, 12 входять до видань, які внесені до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття у зарубіжному виданні, 20 опублікованих тез доповідей та матеріалів конференцій.

Публікації є по кожному з викладених в дисертації розділів.

Автореферат дисертації Воропая О. В. повністю відображає зміст і суть результатів досліджень, викладених в дисертації.

У докторській дисертаційній роботі не використовуються результати досліджень кандидатської дисертаційної роботи.

Оформлення дисертації

Дисертація є завершеною науковою дослідною роботою, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація оформлена згідно відповідних вимог до оформлення. Стиль викладання наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

Зауваження до дисертації

1) У роботі всі числові розрахунки виконані для шарнірно-обпертих пластин. Чи можна за допомогою викладеної методології проводити розрахунки для інших схем опираючих пластин?

2) Викладена загальна методика вирішення ідентифікаційних задач для пластинчатих конструктивних елементів. Слід було вказати особливості використання розробленої методології для інших конструктивних елементів, зокрема оболонок.

3) В класичній вітчизняній науковій літературі відома модель Фойгта, чим вона відрізняється від використаної в роботі моделі Кельвіна– Фойгта?

4) Не зовсім зрозуміло джерело використаної моделі внутрішнього гістерезисного тертя?

5) Слід було пояснити наведений в роботі підхід на основі диференціальних операторів для моделювання внутрішнього тертя в зв'язку з розробкою нового підходу, який використовує лінійні згладжувальні інтегральні оператори.

6) В роботі є деякі стилістичні неточності. Наприклад, семінар Дніпровського університету, на якому доповідалась робота, є також семінаром при Придніпровському Науковому центру НАН України і наукової ради з механіки деформівного твердого тіла при Відділенні механіки НАН України (в роботі вона визначена як рада НАН України).

Зазначені зауваження не є принциповими і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Воропая Олексія Валерійовича «Використання інтегральних рівнянь Вольтерра у нестационарних задачах динаміки пластин» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, які в сукупності вирішують важливу науково-технічну проблему розроблення універсального підходу, отриманого в загальному вигляді розв'язання оберненої задачі, при

якому використовують інтегральні оператори, з виконанням розв'язання трьох класів актуальних задач:

– ідентифікації системи зовнішніх нестационарних навантажень, яка діє на прямокутні пластини;

– спільної ідентифікації зовнішніх навантажень і реакцій при моделюванні нестационарних коливань пластин із зосередженими особливостями (масами, погашувачами коливань, додатковими опорами);

– ідентифікації керуючих впливів при управлінні нестационарними коливаннями пластини.

Сформульована кінцева мета досягнена, а основні наукові і прикладні задачі повністю виконані.

Наукові результати пройшли належну апробацію. Вони достатньо повно опубліковані у фахових виданнях і обговорені на багатьох міжнародних науково-технічних конференціях.

За змістом, обсягом та структурою дисертаційна робота «Використання інтегральних рівнянь Вольтерра у нестационарних задачах динаміки пластин», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, повністю відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013р. зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 15.08.2015р., № 1159 від 30.12.2015р., та № 567 від 27.07.2016р., а її автор, Воропай Олексій Валерійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор,
завідувач відділу міцності і
надійності механічних систем
Інституту технічної механіки
НАН України і ДКА України



В. С. Гудрамович

Підпис проф. В. С. Гудрамовича засвідчую
Учений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ
к.т.н., старш. наук. співробітник



О. М. Маркова