

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Чопорова Сергія Вікторовича
«Математичне моделювання та аналіз форм об'єктів у
САПР машинобудування»,

що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
зі спеціальності 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

Актуальність теми дисертації. Проектування об'єктів сучасного машинобудування пов'язане з використанням складних конструкцій, які можуть поєднувати різні матеріали. Будь-які зміни у геометрії об'єкта або матеріалах, з яких він складається, обумовлюють необхідність дослідження відповідності їх експлуатаційних характеристик до заданих. Для цього використовують різні види моделей. У машинобудуванні натурне дослідження об'єктів є вельми вартісним. Альтернативою натуральному моделюванню є математичне моделювання. Отже, дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності проектування об'єктів машинобудування за рахунок збільшення точності математичного моделювання та зменшення часу, необхідного на дослідження їх стану.

Для моделювання поведінки технічних об'єктів і процесів (наприклад, напружене-деформованого стану, теплообміну тощо) на практиці використовують системи диференціальних рівнянь з частинними похідними, які не мають аналітичного розв'язку. У результаті виникає необхідність застосування чисельних методів, які засновані на ідеї переходу від неперервної моделі об'єкта до дискретної.

Процес підготовки вихідних даних для чисельного аналізу поведінки об'єктів машинобудування може бути значно складнішим і довшим ніж сам аналіз, який забезпечується сучасною комп'ютерною технікою. Для спрощення процесу підготовки вихідних даних розробляють відповідні САПР машинобудування. У процесі розробки таких САПР, по-перше, необхідно



запропонувати лінгвістичне забезпечення, яке дозволить описувати моделі. Для опису форм об'єктів машинобудування використовують різні подання: граничне, конструктивну блокову геометрію, функціональне тощо. Функціональне подання, яке ґрунтуються на використанні неявних функцій, є найбільш універсальним і теоретично дозволяє описати форму об'єкта довільної складності. Неявний опис форми об'єкта дозволяє класифікувати положення точки простору відносно його межі, але потребує розробки методів генерації дискретних моделей. По-друге, САПР аналізу об'єктів машинобудування повинні забезпечувати можливість автоматичної побудови дискретних моделей, які дозволять розв'язати системи диференціальних рівнянь із заданою точністю. Отже, дисертаційна робота, яка присвячена розробці відповідних методів моделювання форм і генерації адаптивних дискретних моделей, дозволяє забезпечити важливу стадію проектування об'єктів машинобудування.

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

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-технічних робіт кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, а також у межах теми «Гібридні аналітико-чисельні методи розв'язку актуальних задач неоднорідного середовища» (№ держреєстрації: 0114U002656).

У межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Аналітико-чисельні методи розв'язку задач механіки неоднорідних конструкцій на базі сучасних комп'ютерних технологій та візуалізація процесів» (№ держреєстрації: 0112U003061); «Розробка математичної моделі розподілу напружень у важконавантажених зубчастих колесах і створення прогресивної технології їх виготовлення» (№ держреєстрації: 0113U000804); «Математичне моделювання конструкцій неоднорідної структури на базі сучасних інформаційних технологій» (№ держреєстрації: 0115U000761); «Розробка математичного забезпечення для інженерного аналізу об'єктів аерокосмічної техніки на базі хмарних технологій» (№ держреєстрації: 0117U007204). При виконанні Гранта Президента України для молодих учених на 2013 рік у межах науково-дослідної

роботи № Ф49/429-2013 «Математичне моделювання складних геометричних об'єктів з використанням технологій паралельних розрахунків» (№ держреєстрації: 0113U006252).

У межах господарських науково-дослідних робіт, які укладено з державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»: договір № 1/15 від 05.02.2015 р. «Розроблення програмно-методичного забезпечення для визначення руйнівних навантажень оболонок тришарової стільникової конструкції із композиційного матеріалу в умовах комплексного експлуатаційного навантаження» (№ держреєстрації: 0115U004162); договір № 5/16 від 05.06.2016 р. «Розробки методики визначення руйнівних навантажень оболонок під дією внутрішнього тиску з урахуванням пластичних деформацій матеріалу і чисельного прогнозування зон руйнування оболонок під дією внутрішнього надлишкового тиску з урахуванням нагріву» (№ держреєстрації: 0116U006602); договір № 8/17 від 16.05.2017 р. «Розробка методики визначення напружено-деформованого стану головного обтічника тришарової стільникової конструкції з раціональним вибором характеристик анізотропії матеріалу в залежності від характеру зовнішнього навантаження конструкцій та розробки розрахункової моделі для визначення критичних значень навантажень» (№ держреєстрації: 0117U001632); договір № 4/18 від 30.05.2018 р. «Розробка методики визначення зон руйнування і граничних тисків для вафельних оболонок паливного відсіку першого ступеню» (№ держреєстрації: 0118U001846); договір № 5/18 від 30.05.2018 р. «Відпрацювання і верифікації (за результатами статичних випробувань) методики визначення зон руйнування паливного відсіку другого ступеню при навантаженні внутрішнім надлишковим тиском» (№ держреєстрації: 0118U001845).

Ступінь обґрутованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Обґрутованість викладених у дисертаційній роботі положень базується на коректних постановках мети і задач дослідження, а також підтверджуються: використанням відомих методів

дослідження, послідовним логічним викладенням матеріалу, порівнянням з результатами інших дослідників, достатньою кількістю публікацій у виданнях, що входять до переліку фахових видань України з технічних наук, публікаціями у міжнародних виданнях та апробацією на чисельних всеукраїнських та міжнародних конференціях.

Оцінка змісту дисертації та її завершеність. Матеріал дисертації викладений логічно і завершено. Робота Чопорова Сергія Вікторовича має загальноприйняту схему та включає: вступ, 7 розділів, висновки, перелік використаних джерел, який містить 505 найменувань на 50 сторінках, і два додатки на 5 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 352 сторінки, у тому числі 297 сторінок основного тексту, який проілюстрований 135 рисунками та 14 таблицями. Теоретичний матеріал дисертації проілюстровано прикладами, її структура професійно скомпонована, а сама робота оформлена згідно вимог.

Зміст, оформлення дисертаційної роботи та повнота викладення наукових положень відповідають паспорту спеціальності та встановленим вимогам до докторських дисертацій згідно з «Порядком присудження наукових ступенів».

Матеріали дисертації достатньо повно викладені у 55 роботах. З них 24 роботи висвітлюють основні результати дисертаційного дослідження: 3 монографії та 21 стаття, серед яких 3 статті опубліковано у періодичних виданнях, які включено до наукометричної бази Scopus, 2 статті опубліковано у журналах, які включено до наукометричної бази Web of Science, 19 робіт опубліковано у наукових фахових виданнях, що включено до Переліку МОН України з технічних наук, у наукових фахових виданнях, що включено до Переліку МОН України з фізико-математичних наук, опубліковано 10 робіт, які додатково висвітлюють наукові результати. Отримано 6 свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми. У збірниках матеріалів конференцій та тез доповідей опубліковано 15 робіт, з них одна робота опублікована у збірнику, який включено до наукометричної бази Scopus.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок із науковими напрямками та науково-дослідними темами. Сформульовано мету, об'єкт, предмет, задачі та методи дослідження, наведено інформацію про роботи автора, які було опубліковано за результатами дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** проведено аналіз предметної області та постановку задач дослідження. У результаті аналізу проблеми виявлено протиріччя між необхідністю побудови дискретних моделей форм об'єктів, які дозволять із заданою точністю виконувати чисельний аналіз стану об'єктів у САПР машинобудування, та обмеженістю існуючих методів. Сформульовано мету та основні задачі, які необхідно вирішити в ході виконання дисертаційної роботи.

У **другому розділі** розглянуті особливості функціонального подання форм об'єктів, заданих кресленнями. Побудовані функціональні моделі для фрикційного диску трансмісії, планки, прокладки, гайки з метричною різьбою, переходника задньої ступиці, подовжувача важеля передньої підвіски, пробки, поршня тощо. Розроблені функціональні моделі базуються на використанні неявних функцій, які «сконструйовано» з використанням логічних операцій кон'юнкції, диз'юнкції та заперечення теорії R-функцій. Показано, що у деяких випадках, коли елементи форми об'єкта подані гранично, наприклад, з використанням поверхонь Безье, використання функціонального подання може бути незручним. Для таких випадків автор дисертаційної роботи розробив гібридне подання, яке дозволяє поєднувати геометричні примітиви, подані неявними функціями, з примітивами, поданими параметричними функціями. У результаті, наприклад, при моделюванні крила літака його поверхню можна подати гранично з використанням параметричних функцій, а технологічні отвори – неявними функціями.

У **третьому розділі** розглянуті особливості формалізації дискретних моделей форм об'єктів. У цьому розділі для подання дискретної моделі у вигляді $M = (N, E)$, де N – множина вузлів (пар: координати / список інцидентних елементів), E – множина елементів (впорядкованих множин вказівників на вузли), наведено псевдокоди алгоритмів типових операцій.

Виконано емпіричне дослідження двох можливих реалізацій подання, а саме засноване на використанні динамічних масивів і засноване на використанні двозв'язних списків для зберігання вузлів та елементів. Серія обчислювальних експериментів для порівняння цих двох реалізацій показала, що перші (спискові) більш ефективні при видаленні вузлів, а другі – при безпечному додаванні (при вставці з перевіркою існування вузлів з однаковими координатами).

У четвертому розділі розроблено проекційний метод генерації дискретних моделей меж об'єктів, форма яких задана функціонально. Основна ідея метода полягає у використанні фонової дискретної моделі, яка складається з елементів довільної форми. Для більш точного подання особливостей меж об'єктів (наприклад, зламів поверхні) автором дисертаційної роботи запропоновано використовувати згладжування, яке ґрунтуються на мінімізації функціоналу. У запропонованому функціоналі враховано відстані від інцидентних елементів до межі та відстані до сусідніх вузлів.

У п'ятому розділі розроблено метод побудови множини симплексів, в якому операція вставки вузла узагальнена для генерації дискретної моделі форми довільного дво- або тривимірного об'єкта, заданої неявною функцією. Проте, техніка вставки нового вузла практично не може застосовуватися для побудови дискретних моделей форм об'єктів на базі чотирикутників або шестигранників. У результаті розроблено метод генерації дискретних моделей на базі елементів типу солід для форм об'єктів, заданих функціонально, який можна використовувати для трикутників, тетраедрів, чотирикутників і шестигранників. Для усунення вироджених елементів автором розроблено метод згладжування внутрішніх вузлів, який ґрунтуються на мінімізації функціоналу площини / об'єму. Виконане у цьому розділі емпіричне дослідження впливу кількості ітерацій на результати згладжування дозволило зробити висновок, що для практичного застосування достатньо 8–10 ітерацій. Це обумовлено тим, що при цій кількості ітерацій значення функціоналу, отримане шляхом пошуку у кожному вузлу окремо (локальний алгоритм), наближається

до результату його мінімізації для всіх вузлів одночасно (глобальний алгоритм). Дослідження витрат часу, дозволяє зробити висновки, що локальний алгоритм мінімізації функціоналу у середньому на три порядки довший згладжування Лапласа і на три порядки швидший пошуку його мінімуму за допомогою глобального алгоритму.

У **шостому розділі** емпірично досліджено вплив форми елементу на точність скінченно-елементного аналізу напружене-деформованого стану об'єктів. У порівнянні моделей на базі симплексів з моделями на базі топологічних кубиків (четирикутників або шестигранників) використано однакові базові набори вузлів. Порівняння чисельних рішень з відомими аналітичними дозволило зробити висновок, що трикутники і чотирикутники дозволяють отримати значення переміщень, досить близькі до аналітичного рішення, але чотирикутники дозволяють більш точно апроксимувати похідні значення (напруження). Самостійне наукове значення має розроблений автором метод побудови адаптивних дискретних моделей. Цей метод дозволяє збільшувати кількість вузлів у областях, у яких найбільший градієнт цільової функції або в околі екстремальних значень, що дозволяє підвищувати точність моделювання при раціональному збільшенні розмірності задачі.

У **сьомому розділі** розроблено шаблони проектування об'єктно-орієнтованих САПР машинобудування для математичного моделювання форм об'єктів і скінченно-елементного аналізу їх поведінки. У результаті об'єктної декомпозиції отримано шаблон проектування «UI–Model–Analysis», який дозволяє розбити САПР машинобудування на високорівневі частини, а також відділення класів, які пов'язані з графічним інтерфейсом від класів моделі та процесора. Шаблон проектування «Representation–Mesh» відповідає за розподіл обов'язків між класами подання форм об'єктів і генерації дискретних моделей. Шаблон проектування «Element–Node» відповідає за розробку об'єктної декомпозиції для визначення елементів, як композицій вузлів, ребер і граней. Шаблон проектування «FEA Problem» відповідальний за визначення структури алгоритму скінченно-елементного аналізу та об'єктної композиції для граничних умов та сил, які беруть

участь в задачі. Для кожного шаблону встановлені зв'язки з іншими відомими шаблонами проектування. Розглянуто особливості генерації дискретних моделей та скінченно-елементного аналізу в паралельних комп'ютерних системах. Розроблено проблемну-орієнтовану мову для математичного моделювання та аналізу форм об'єктів у САПР машинобудування. Ця мова використовує стандарт ECMAScript у базовому синтаксисі, що спрощує її вивчення користувачами. Для опису форм об'єктів вбудовано примітиви, задані неявними функціями, а також засоби опису форм гібридним підходом. Передбачено засоби опису задач скінченно-елементного аналізу (у тому рахунку з використанням адаптивних моделей) поведінки дво- і тривимірних моделей тіл, пластин і оболонок.

У **висновках** зроблено загальну оцінку результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

Нові наукові результати дисертаційної роботи. У якості основних нових наукових результатів, отриманих у роботі, слід зазначити таке:

– вперше запропоновано гібридний підхід до подання форм об'єктів, що відрізняється від відомих, використанням примітивів, які задані неявними функціями (функціональне подання) та власними границями (границне подання), що дозволяє зменшити час побудови математичних моделей;

– вперше запропоновано проекційний метод генерації дискретних моделей меж об'єктів, в яких, на відміну від існуючих, форма задана функціонально, що дозволяє будувати дво- та тривимірні дискретні моделі;

– вперше запропоновано метод згладжування координат вузлів дискретних моделей меж об'єктів, форма яких, на відміну від відомих, задана функціонально, що дозволяє підвищити точність моделювання в околах зламів їх поверхонь;

– отримав подальшого розвитку метод локальних перебудов елементів дискретних моделей у частині його узагальнення на випадок дискретних моделей на базі трикутних або чотирикутних елементів для меж об'єктів, що дозволяє підвищити точність скінченно-елементного аналізу;

– вперше запропоновано метод генерації дискретних моделей на базі

елементів типу солід для форм об'єктів, на відміну від існуючих, заданих функціонально, що дозволяє будувати дво- і тривимірні моделі як з використанням симплексів (трикутників або тетраедрів), так і з використанням топологічних кубів (четирикутників або шестигранників);

– вперше запропоновано метод згладжування координат внутрішніх вузлів дискретних моделей форм об'єктів, відмінність якого від інших методів полягає в усуненні вироджених елементів, що дає підвищення точності скінченно-елементного аналізу;

– вперше запропоновано метод генерації адаптивних дискретних моделей форм об'єктів (adaptivemeshing), на відміну від ісуючих, заданих функціонально, що дозволяє будувати дво- і тривимірні дискретні моделі для виконання скінченно-елементного аналізу із потрібною точністю;

– отримали подальшого розвитку методи генерації дискретних моделей форм об'єктів і скінченно-елементного аналізу у частині розробки паралельних алгоритмів, що дозволяє зменшити витрати часу на моделювання;

– вперше розроблена проблемно-орієнтована мова, яка дозволяє, на відміну від ісуючих, описувати об'єкти машинобудування складної форми з використанням гіbridного підходу, а також задачі побудови дискретних моделей та скінченно-елементного аналізу.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів. Результати, отримані у результаті виконання дисертаційного дослідження, у сукупності є вирішенням науково-технічної проблеми підвищення ефективності проектування об'єктів машинобудування за рахунок збільшення точності математичного моделювання та зменшення часу, необхідного на дослідження їх стану. Отримані науково-технічні ефекти:

– підвищення якості візуального подання моделей об'єктів машинобудування;

– зниження витрат на натурні випробування об'єктів, що проектуються, за рахунок підвищення точності моделювання при дослідженні їх стану з використанням чисельних методів на базі дискретних моделей.

Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації.

Автореферат дисертації достатньо адекватно віддзеркалює структуру і основні положення дисертації, стиль і мову викладення теоретичного та прикладного матеріалу. Оформлення дисертації та автореферату відповідає встановленим вимогам і виконано на належному рівні.

Зауваження щодо змісту й оформлення дисертаційної роботи.

Визначаючи важливe теоретичне та практичне значення дисертації та новизну наукових положень, слід також вказати на певні недоліки та окремі дискусійні моменти, до яких можуть бути віднесені такі.

1. У 1 розділі дисертаційної роботи значну увагу приділено дослідженню методів побудови та оптимізації дискретних моделей. Проте не висвітлено вплив методів побудови дискретних моделей на точність аналізу поведінки технічних об'єктів.

2. У 2 розділі на сторінках 79–99 наведено основні геометричні примітиви, подані функціонально, а також приклади побудови моделей форм технічних об'єктів. Процес побудови таких моделей для інженера потребує знань математичної теорії R-функцій, що може ускладнювати його діяльність.

3. На рисунках 3.2 – 3.4 наведено залежності часу від кількості елементів і вузлів у дискретній моделі. Ці графіки мають форму кривих, близьку до теоретичної оцінки, майже відсутні локальні екстремуми, обумовлені іншими процесами, що виконує комп’ютер. З тексту дисертації не зрозуміло як забезпечено відсутність впливу на вимірювання інших процесів, що виконує комп’ютер.

4. При аналізі результатів використання методів побудови дискретних моделей (п. 4.1.5) і методів моделювання меж об'єктів (п. 4.2.6) не приведено числових значень зниження витрат та підвищення точності моделювання для підтвердження ефективності цих методів, що ускладнює оцінку досягнення поставленої в роботі мети.

5. У підрозділі 5.5 при побудові дискретної моделі поверхні, поданої гібридно, автор дисертації пропонує використовувати локальний пошук

мінімуму відстані від точки на параметричній поверхні до центра екваторіального кола трикутника (сторінка 219). Проте, не досліджена обчислювальна складність такого пошуку.

6. У підрозділі 7.3 автором описано проблемно-орієнтовану мову. Відсутнє доведення повноти і несуперечності цієї мови.

7. У дисертації наведено велику кількість алгоритмів розроблених методів у вигляді псевдокодів, що ускладнює сприйняття роботи.

8. У висновках дисертаційної роботи щодо напрямів подальших досліджень слід було вказати, що методи побудови дискретних моделей можна використати не тільки у САПР машинобудування, та, наприклад, у САПР будівництва й архітектури.

9. Дисертаційна робота містить певну кількість стилістичних і граматичних помилок, на які автору вказано, але вони не мають суттєвого впливу на сприйняття її змісту.

Наведені зауваження не зменшують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, її наукової та практичної цінності та мають характер побажань щодо подальшого розвитку роботи.

Загальний висновок. Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі. Зміст дисертаційної роботи і автореферату ідентичні. Об'єм дисертаційної роботи відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Зауваження до матеріалів дисертаційної роботи, що наведені у відгуку, не ставлять під сумнів результати роботи. Дисертаційна робота С. В. Чопорова є закінченим науковим дослідженням, містить нові рішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності проектування об'єктів машинобудування за рахунок збільшення точності математичного моделювання та зменшення часу, необхідного на дослідження їх стану, має теоретичну та практичну значимість та відповідає паспорту спеціальності, «Вимогам до оформлення дисертації» і «Порядку присудження наукових ступенів».

Виходячи з мети, наукової новизни та практичного значення одержаних

результатів та високої якості виконання дисертаційної роботи, Чопоров Сергій Вікторович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт.

Офіційний опонент,

завідувач кафедри автоматизації

та комп’ютерно-інтегрованих технологій

Харківського національного

автомобільно-дорожнього університету,

доктор технічних наук, професор



Нефьодов Л.І.

ВІД МС
ЗАСВІДЧУЮ ВЧЕНІЙ
СЕ РЕТОР ХНАДУ

