

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Чопорова Сергія Вікторовича

### «Математичне моделювання та аналіз форм об'єктів у САПР машинобудування»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.13.12 — системи автоматизації проектувальних робіт

#### Актуальність теми та зв'язок роботи з науковими програмами.

Використання сучасних методів математичного моделювання, потужних комп'ютерних систем і технологій дозволяє зменшити витрати на натурні експерименти, а також зробити прогнози відносно режимів експлуатації. Такі наукові дисципліни, як механіка, фізика та їх численні розділи, є, фактично, впорядкованими множинами математичних моделей, побудова яких супроводжується теоретичним обґрунтуванням адекватного відображення цими моделями властивостей процесів і явищ, що розглядаються. Останнім часом при проектуванні технічних об'єктів та інженерних конструкцій все більше зростає складність та важливість побудови якісних математичних моделей, які, на жаль, часто не мають аналітичного розв'язку. Доводиться переходити до наближених методів чисельного аналізу, коли виникає необхідність переходу від неперервної моделі об'єкта до дискретної. При побудові дискретних моделей об'єктів машинобудування найбільш універсальним є функціональне подання, яке ґрунтується на використанні неявних функцій, і теоретично дозволяє описати форму об'єкта довільної складності.

Слід відмітити, що проблема підвищення ефективності проектування об'єктів машинобудування за рахунок збільшення точності математичного моделювання та зменшення часу, необхідного на дослідження їх стану, якою займається автор дисертації, є актуальною також і при 3D-моделюванні машинобудівних об'єктів і виготовленні прототипів виробів на 3D-принтері при створенні нового об'єкта та для отримання швидкої заміни зношених деталей.

Крім того, актуальність роботи підтверджується її зв'язком 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).

У межах госпдоговірних науково-дослідних робіт: 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), який укладено з державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»; 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), який укладено з державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»; 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), який укладено з державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»; 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), який укладено з державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»; 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), який укладено з державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Також протягом виконання 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). Автор – науковий керівник науково-дослідної роботи.

**Метою дисертаційного дослідження** є розробка ефективних методів математичного моделювання форм об'єктів у САПР машинобудування.

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел, який містить 505 найменувань, та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 352 сторінки, у тому числі 297 сторінок основного тексту, 135 рисунків та 14 таблиць.

#### **Характеристика змісту роботи.**

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету та задачі роботи, вказано об'єкт, предмет і методи досліджень, описано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок автора у роботи, виконані в співавторстві, наведено інформацію про апробацію та публікації результатів досліджень.

**У першому розділі** обґрунтовується використання методів математичного моделювання, які дозволяють замінити вартісний натурний експеримент дослідженням математичної моделі об'єкта у сучасних будівництві, авіа-, машино-, судо- і ракетобудуванні, де існує потреба у зменшенні собівартості продукції. На практиці при використанні наближених чисельних методів, заснованих на ідеї

переходу від неперервної моделі форми об'єкта до дискретної, виникає проблема, пов'язана з протиріччям між необхідністю побудови дискретних моделей форм об'єктів, які дозволяють із заданою точністю виконувати чисельний аналіз стану об'єктів у САПР машинобудування, та обмеженістю існуючих методів. А більшість публікацій не дають відповіді на питання, яким саме чином можна будувати адаптивні дискретні моделі для форм об'єктів при функціональному підході, який виявлено як найбільш універсальний.

У **другому розділі** запропоновано математичний апарат для формування кінцевої моделі форми об'єкта, що дозволяє одночасно використовувати примітиви, межі яких визначені за допомогою параметричних і неявних функцій. Водночас моделі на базі параметричних функцій можуть виступати як операнди R-операцій. Отримані моделі можна розглядати як гібридні, що поєднують функціональне подання на базі неявних функцій і граничне подання на базі параметричних функцій. На відміну від робіт, присвячених моделюванню форм об'єктів з використанням теорії неявних функцій і R-функцій, запропонований метод дозволяє простіше описувати області, обмежені кривими або поверхнями Безьє, b-сплайнами або NURBS. Перехід від граничного подання форми до дискретної моделі дозволяє порівняно легко автоматизувати даний математичний апарат.

**Третій розділ** присвячено розробці підходу до формального опису дискретних моделей форм об'єктів, який дозволяє використовувати єдину нотацію при викладі методів їх автоматичної генерації. Представлення дискретної моделі множинами вузлів і елементів водночас зі зберіганням для кожного вузла разом з його координатами списку інцидентних елементів дозволяє знизити порядок складності алгоритмів вставки та видалення вузлів. Серія обчислювальних експериментів для порівняння двох реалізацій — на основі спискових та векторних структур даних — показала, що перші (спискові) більш ефективні при видаленні вузлів, а другі — при безпечному додаванні (при вставці з перевіркою існування вузлів з однаковими координатами). Векторні структури практично на порядок повільніші за спискові, однак вони дозволяють розробити ефективні паралельні алгоритми ітерування.

**Четвертий розділ** присвячено дискретним моделям меж виробів машинобудування. Розроблений метод побудови дискретних моделей меж об'єктів теоретично дозволяє використання елементів довільної форми. Водночас щільність вузлів у підсумковій моделі залежить від щільності вузлів у вихідній. Проте, запропонований метод не враховує геометричних особливостей форми об'єкта і, отже, повинна застосовуватися додаткова оптимізація. Запропонований метод згладжування дискретних моделей меж об'єктів ґрунтується на локальній мінімізації функціоналу відстані-довжини. Для чисельної реалізації пошуку мінімуму запропонована модифікація методу Гауса. Проведений обчислювальний експеримент показав, що для отримання дискретних моделей форм об'єктів задовільної якості кількість ітерацій повинна бути не нижче чотирьох, а підвищення кількості ітерацій до значення більше восьми суттєво не змінює якості моделі. У результаті застосування цього методу мінімальні кути для трикутників несуттєво збільшуються, а у чотирикутниках можливо отримати елементи, за формулю близькі до трикутників, отже, результати згладжування потребують додаткового оброблення топологічними перебудовами елементів. Метод локальних перебудов елементів дискретних моделей меж об'єктів дозволяє збільшити значення мінімального кута в елементі для дискретних моделей на

базі трикутників і зменшити значення максимального кута в елементі для у дискретних моделях на базі чотирикутників.

**У п'ятому розділі** автором розроблено метод генерації дискретних моделей на базі елементів типу солід. Цей метод дозволяє використовувати спільний алгоритм для двовимірних і тривимірних моделей на базі симплексів і топологічних кубиків. Для покращення характеристик дискретних моделей розроблено новий метод локального згладжування, який дозволяє усунути вироджені елементи. Такий метод дозволяє отримати якість дискретних моделей, порівняну з результатами глобальної оптимізації координат вузлів, але водночас використовує менше обчислювальних ресурсів. Спільне використання узагальненого методу генерації дискретних моделей, методу згладжування координат вузлів на межі (розробленого у четвертому розділі) та згладжування внутрішніх вузлів дозволить генерувати дискретні моделі високої якості з адаптацією до зламів форм об'єктів.

**У шостому розділі** автором отримано новий метод генерації адаптивних дискретних моделей форм об'єктів, які задані функціонально. Запропонований метод на відміну від описаних у попередніх розділах аналізує результати методу скінченних елементів, а не тільки інформацію про форму об'єкту. Як результат, кількість вузлів і елементів збільшується у тих областях, де найбільше змінюється потрібна досліднику величина. Розроблений метод генерації адаптивних дискретних моделей не залежить від форми елементів. Він використовує таблиці шаблонів розбиття елементів, внаслідок чого можна використовувати єдиний алгоритм для основних форм елементів. Дослідження впливу форми скінченних елементів на точність моделювання дозволяє зробити висновок, що при використанні лінійних функцій форми симплекси є менш точними відносно топологічних кубиків. Так, розглянуті класичні задачі, для яких відомі аналітичні розв'язки доводять, що при дослідженні напружено-деформованого стану обидві групи елементів майже однакові з точки зору обчислення переміщень, проте чотирикутники та шестигранники точніші при обчисленні напружень.

**У сьомому розділі** з використанням базових шаблонів проектування «UI-Model-Analysis», «Representation-Mesh», «Element-Node», «FEA Problem» автором запропоновано метод генерації дискретних моделей з використанням технологій паралельних обчислень, що дозволяє зменшити час, витрачений на моделювання, якщо необхідна велика кількість вузлів для досягнення точності. Зокрема, отримані залежності часу розв'язання від кількості вузлів доводять, що за малої кількості вузлів економія часу від використання паралельних технологій може бути відсутньою. Водночас, чим складніша модель форми об'єкта, тим менша кількість вузлів потрібна для економії витрат часу за рахунок паралельності метода. Розроблена у цьому розділі проблемно-орієнтована мова дозволяє, використовуючи схожий з конструюванням підхід, описувати форми об'єктів. Для цього у синтаксисі мови передбачено примітиви, що відповідають неявним функціям, які представляють поширені форми. Водночас вбудовані та створені користувачем функції можна використовувати при описі скінченноелементних задач. Як результат, забезпечено гнучкість моделювання об'єктів у САПР машинобудування.

**Нові наукові результати, отримані автором дисертації.**

Підсумовуючи аналіз роботи, можна виділити наступні нові наукові результати, які отримано дисертантом.

– вперше запропоновано гібридний підхід до подання форм об'єктів з використанням примітивів, які задані функціонально та гранично, що дозволяє зменшити час побудови математичних моделей;

– вперше запропоновано проєкційний метод генерації дискретних моделей меж об'єктів, форма яких задана функціонально, що дозволяє будувати дво- та тривимірні дискретні моделі;

– вперше запропоновано метод згладжування координат вузлів дискретних моделей меж об'єктів, форма яких задана функціонально, у результаті чого можна підвищити точність моделювання в околах зламів;

– 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 скінченноелементного аналізу;

– вперше запропоновано метод генерації дискретних моделей на базі елементів типу солід для форм об'єктів, заданих функціонально, який дозволяє будувати дво- і тривимірні моделі як з використанням симплексів (трикутників або тетраєдрів), так і з використанням топологічних кубів (чотирикутників або шестигранників);

– вперше запропоновано метод згладжування координат внутрішніх вузлів дискретних моделей форм об'єктів, у результаті застосування якого можна усунути вироджені елементи та підвищити точність скінченноелементного аналізу;

– вперше запропоновано узагальнений метод генерації адаптивних дискретних моделей форм об'єктів, заданих функціонально, який дозволяє будувати дво- і тривимірні дискретні моделі для виконання скінченноелементного аналізу із заданою точністю;

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

– вперше розроблено проблемно-орієнтовану мову, яка дозволяє описувати форми об'єктів з використанням гібридного підходу, дискретні моделі, а також задачі скінченноелементного аналізу.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені у дисертаційній роботі методи можуть бути використані конструкторськими бюро і науково-дослідними організаціями для розробки САПР. Розв'язання задач дослідження дозволило розробити САПР для математичного моделювання та чисельного аналізу стану об'єктів машинобудування на базі адаптивних дискретних моделей. Результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету для розробки лабораторних робіт у курсах «Паралельні та розподілені обчислення» і «Програмне забезпечення наукових досліджень». Вони також впроваджені в науково-виробничу діяльність державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

#### **Апробація результатів.**

Наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах кафедри програмної інженерії Запорізького національного

університету, а також на міжнародних конференціях, у тому числі: IV Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми прикладної механіки і міцності конструкцій» (м. Запоріжжя, 2012 р.); V Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології» (м. Київ, 2012 р.); XIII Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2012), яка присвячена 370-річчю з дня народження Ньютона (м. Херсон, 2012 р.); XIV Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2013), яка присвячена 150-річчю з дня народження академіка А. М. Крилова (м. Херсон, 2013 г.); The 3rd International Conference on High Performance Computing HPC-UA 2013 (Київ, 2013 р.); XV Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2014), яка присвячена 160-річчю з дня народження Анрі Пуанкаре (м. Херсон, 2014 р.); Шостий Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» (м. Київ, 2014 р.); V Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (м. Запоріжжя, 2015 р.); XVI Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2015, яка присвячена 225-річчю з дня народження Августа Фердинанда Мьобіуса (м. Херсон, 2015 р.); П'ятнадцята Міжнародна конференція «Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2015)» (м. Одеса, 2015 р.); XVII Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2016, яка присвячена 280-річчю з дня народження Луї Лагранжа (сmt. Лазурне, Херсонська обл., 2016 р.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2017» (м. Київ, 2017 р.); Шоста Міжнародна наукова конференція «Космічні технології: сучасне та майбутнє» (м. Дніпро, 2017 р.); VI міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (м. Запоріжжя, 2017 р.); VI Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології ICT-2017», присвячена 80-річчю В. В. Свиридова (Харків-Коблево, 2017 р.); XVIII міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2017, яка присвячена 100-річчю з дня народження академіка Ю. О. Митропольського (сmt. Лазурне, Херсонська обл., 2017 р.); VI-ий міжнародний радіоелектронний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (м. Харків, 2017р.); IV Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, управління та штучний інтелект» (м. Харків, 2017 р.); Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми механіки та математики» присвячена 90-річчю від дня народження академіка НАН України Ярослава Степановича Підстригача та 40-річчю створеного ним Інституту прикладних проблем механіки і математики НАН України (м. Львів, 2018 р.); The 14th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer ICTERI-2018 (Київ, 2018 р.); The 23rd International Conference "Mechanika-2018" (Druskininkai, Lithuania, 2018 р.); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології ICT-2018», присвячена 55-річчю кафедри Прикладної математики ХНУРЕ, 55-річчю кафедри Програмної інженерії ХНУРЕ та 40-річчю кафедри Прикладної математики та інформаційних технологій ХНУМГ імені О.М. Бекетова (Харків-Коблево, 2018 р.); XIX Міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 250-річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є (сmt. Лазурне, Херсонська обл., 2018 р.).

## Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, в опублікованих працях.

За результатами дисертації опубліковано 55 наукових праць, серед яких 3 монографії, 3 роботи в виданнях, які реферуються та включені до наукометричної бази Scopus; 2 роботи в виданнях, які реферуються та включені до наукометричної бази Web of Science. У спеціалізованих виданнях, що включено до Переліку МОН України з технічних наук, опубліковано 19 робіт. У спеціалізованих 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 1 — у збірнику, який включено до наукометричної бази Scopus).

Зазначені наукові роботи були опубліковані після захисту кандидатської дисертації автора у 2011 р., відповідно, матеріали кандидатської дисертації не ввійшли до докторської.

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових кваліфікаційних виданнях.

Автореферат дисертації в повному обсязі відображує зміст роботи та отримані автором результати досліджень.

### Зауваження щодо змісту дисертації:

1. У підрозділі 1.5 «Аналіз методів подання форм об'єктів» наведено вісім основних схем подання. Незрозуміло, у чому полягає різниця недоліків пунктів 3 та 6.

2. У підрозділі 2.1 наведено способи визначення  $\gamma$ -множин. Слід зазначити, що при підході №2 потрібно іноді вказувати, чи є область опуклою, чи ні, що значно утруднює формалізацію. Автор про це не згадує.

3. Після формули (2.12) написано: «...тоді на відповідних сторонах круглі області збіжаться». Можливо, це — невдале формулювання, але воно додає незрозумілості.

4. У підрозділі 2.4.2 наведено альтернативне представлення поверхні метричної різьби. Незрозуміло, чи є в нього переваги перед вихідним представленням.

5. У підрозділі 4.2 йдеться про метод згладжування координат вузлів дискретних моделей меж об'єктів, заданих функціонально. Для цього автор вводить функціонал відстані-довжини та мінімізує його. В данному випадку можна було б використати відоме поняття – нормалізацію опорних функцій, що дало б подібний ефект.

6. В таблиці 5.10 наведено залежність часу згладжування від кількості вузлів для пластинки з трикутним отвором. Ця пластинка є порівняно простою областю, але ми бачимо, що у випадку глобальної оптимізації час виконання процедури є дуже значним. Мабуть, потрібно було б якось розділити галузі застосування згладжування Лапласа, локальної та глобальної мінімізації, або сформулювати деякий критерій застосування.

7. У підрозділі 5.5 визначено операцію обчислення відстані між двома точками як норму різниці значень функції параметричної поверхні у відповідних точках, що, на мою думку, не є очевидним.

8. В розділах 6 та 7 у прикладах не наведено математичну модель. Незрозуміло, яка саме задача розв'язується. Наведено тільки якісний опис.

9. В розділі 6 наведено декілька прикладів дослідження напружено-

деформованого стану, результати порівнюються з обчисленнями у системі ANSYS та з аналітичними розв'язками. Було б доцільним подання порівняння у тому числі у вигляді, наприклад, графіків, як це зроблено для порівняння часу обчислення. Крім того, це дозволило б бачити порівняння не тільки екстремальних значень напружень.

10. Щодо оформлення дисертаційної роботи слід зазначити, що помічено певну кількість орфографічних помилок. Крім того, є описки в індексах формул (наприклад, на стор. 46: написано  $y_i$ , повинно бути  $y_j$ ) і т. ін..

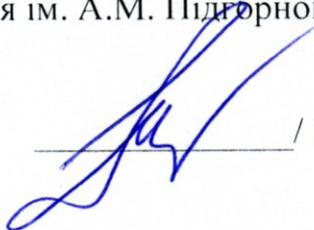
Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

**Висновок.**

На підставі викладеного вважаю, що дисертація Чопорова Сергія Вікторовича «Математичне моделювання та аналіз форм об'єктів у САПР машинобудування», є завершеною науковою працею. В ній отримано нові науково обґрунтовані результати, які у сукупності розв'язують важливу науково-технічну задачу підвищення ефективності проектування об'єктів машинобудування за рахунок збільшення точності математичного моделювання та зменшення часу, необхідного на дослідження їх стану. Роботу виконано на високому науково-технічному рівні. Вона відповідає спеціальності 05.13.12 — системи автоматизації проектувальних робіт. У відповідності до позитивних висновків відносно актуальності теми дослідження, наукової новизни та вірогідності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків та результатів, отриманих автором, вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема, вимогам пп. 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів...», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Чопоров Сергій Вікторович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 — системи автоматизації проектувальних робіт.

Офіційний опонент,  
учений секретар

Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України,  
д-р техн. наук, ст. наук. співр.



/ Максименко-Шейко К.В. /

Підпис д.т.н. Максименка-Шейка К.В. засвідчую:  
заступник директора Інституту проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
канд. техн. наук, ст. наук. співр.



/Курська Н.М./