

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з навчальної роботи
Національного технічного
університету України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”



к.філос.н., проф.
Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО

“ 14 ” березня 2024 р.

з протоколу № 13 від 06 березня 2024 р. розширеного засідання
кафедри прикладної математики
Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

БУЛИ ПРИСУТНІ:

- з кафедри прикладної математики:
- завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф. Чертов О. Р.;
- вчений секретар каф. прикл. матем., старший викладач каф. прикл. матем., канд. техн. наук, доц. Тавров Д. Ю.;
- професор каф. прикл. матем., д-р фіз.-мат. наук, проф. Лось В. М.;
- професор каф. прикл. матем., д-р фіз.-мат. наук, с.н.с. Норкін В. І.;
- професор каф. прикл. матем., д-р техн. наук, проф. Ориняк І. В.;
- доцент каф. прикл. матем., канд. техн. наук, доц. Андрусенко О. М.;
- доцент каф. прикл. матем., канд. фіз.-мат. наук, доц. Костюшко І. А.;
- доцент каф. прикл. матем., канд. техн. наук, с.н.с. Маслянко П. П.;
- доцент каф. прикл. матем., канд. техн. наук, доц. Сирота С. В.
- доцент каф. прикл. матем., канд. техн. наук, доц. Ліскін В. О.;
- доцент каф. прикл. матем., канд. техн. наук, доц. Олефір О. С.;
- доцент каф. прикл. матем., канд. техн. наук, доц. Третинник В. В.;
- старший викладач каф. прикл. матем., канд. фіз.-мат. наук Бай Ю. П.;
- старший викладач каф. прикл. матем. Мальчиков В. В.;
- старший викладач каф. прикл. матем. Темнікова О. Л.;
- асистент каф. прикл. матем. Громова В.В.;
- асистент каф. прикл. матем. Жук І. С.;
- асистент каф. прикл. матем. Ковальчук-Химюк Л. О.;
- асистент каф. прикл. матем. Щьоголев М. О.;
- аспірант каф. прикл. матем. Дяченко О. М.;
- аспірант каф. прикл. матем. Мазурик Р. В.;
- аспірант каф. прикл. матем. Козирев А.Ю.
- з інших кафедр КПІ ім. Ігоря Сікорського:

- гарант освітньо-наукової програми, завідувач кафедри математичного моделювання та аналізу даних, д-р техн. наук, проф., Куссуль Н. М.;
- завідувач кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, д-р техн. наук, професор Вірченко Г. А.;
- професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів, д-р фіз.-мат наук, професор Янчевський І. В.;
- доцент кафедри математичного моделювання та аналізу даних к-т техн. наук Хайдуров В. В.

Запрошені з інших організацій:

- заступник директора з наукової роботи Інституту прикладних проблем механіки і математики НАН України, д-р. фіз.-мат наук, професор Токовий Ю. В.;
- професор кафедри будівельної механіки КНУБА, професор, д-р техн. наук Максим'юк Ю. В.

СЛУХАЛИ:

1. Повідомлення аспіранта кафедри прикладної математики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Мазурика Романа Володимировича за матеріалами дисертаційної роботи "Метод базових та згладжувальних рішень для аналізу статичної деформації геометрично-нелінійних одновимірних систем", поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика. Освітньо-наукова програма Прикладна математика.

Тему дисертаційної роботи "Метод базових та згладжувальних рішень для аналізу статичної деформації геометрично-нелінійних одновимірних систем" затверджено на засіданні Вченої ради факультету прикладної математики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (протокол № 4 від 30 листопада 2020 року) та перезатверджено на засіданні Вченої ради факультету прикладної математики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (протокол № 6 від 01 листопада 2023 року).

Науковим керівником затверджений д-р техн. наук, проф. Ориняк І.В.

2. Запитання до здобувача.

Запитання по темі дисертації ставили:

- д.т.н., професор Чертов Олег Романович;
- д.т.н., професор Вірченко Геннадій Анатолійович;
- д.т.н., професор Токовий Юрій Владиславович;
- д. фіз.-мат. наук, професор Лось Валерій Миколайович;
- д.т.н., професор Янчевський Ігор Владиславович;
- д-р фіз.-мат. наук, с.н.с. Норкін Володимир Іванович;
- д.т.н., професор Максим'юк Юрій Всеволодович.

3. Виступи за обговореною роботою.

В обговоренні дисертації взяли участь:

д.т.н., професор Чертов Олег Романович;

д.т.н., професор Вірченко Геннадій Анатолійович;

д. фіз.-мат. наук, професор Лось Валерій Миколайович;

д.т.н., професор Янчевський Ігор Владиславович;

д.т.н., професор Максим'юк Юрій Всеволодович

д.т.н., професор Куссуль Наталя Миколаївна.

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження:

1. Актуальність теми дослідження

Інженерні розрахунки машин та конструкцій традиційно виконуються в геометрично лінійній постановці, де вважається, що деформаційні переміщення і зміна форми тіла є незначними і не впливають на розрахункову схему. Зафіксовані в сучасних нормативних документах вимоги щодо покращання точності аналізу (трубопровідна індустрія, підйомно-транспортні машини) з врахуванням великих деформаційних переміщень роблять актуальними створення методів аналізу в геометрично-нелінійній (ГН) постановці. Більше того, сучасна тенденція застосування проектних розрахунків для гнучких медичних приборів (ендоскопи), розбірних будівельних конструкцій (палатки, манежи, куполи), спортивного спорядження (шести, ракетки), вантових мостових чи архітектурних конструкцій - спонукають до створення методів і програм розрахунку, що враховують зміну форми тіла в процесі навантаження. Застосування ГН аналізу гнучких довгих тіл є актуальним при геометричному моделюванні (побудова апроксимаційних й інтерполяційних сплайнів) траєкторій і зображень, а також в кіноіндустрії, де вимога правдоподібності згенерованих комп'ютером процесів деформування та руху приводить до все ширшого застосування алгоритмів, що ґрунтуються на фізичних моделях, тобто є рішеннями диференціальних рівнянь деформації балок чи канатів.

Потрібно констатувати, що сучасні комерційні програми, при всій своїй досконалості, розвинутому математичному забезпеченні, зручності застосування та представлення вхідних і вихідних даних - все ще не здатні вирішувати подібні задачі. Це пов'язано як з недоліками аналітичних розрахункових елементів, що застосовуються для моделювання властивостей фізичних тіл, так і з організацією ітераційних процесів. Власне, з цим і пов'язаний широкий потік наукових розробок в літературі, які, проте, мають вузьке застосування та недостатнє підтвердження чисельними й експериментальними тестами.

До недоліків існуючих методів віднесемо таке. По-перше, майже всі вони базуються на принципах мінімізації енергії. Вона визначається добутком

здалегідь вибраних ступенів свободи, що характеризують положення певних точок, на відомі інтерполяційні функції. Очевидно, є сумнівним те, чи можуть такі штучно сконструйовані функції моделювати всі диференційні залежності між фізичними і геометричними параметрами задач. По-друге, для нелінійних задач необхідно проводити лінеаризацію, щоб отримати систему лінійних рівнянь. Всі існуючі методи будують неперервні ітераційні наближення, що мало відрізняються від попереднього, і це приводить до дуже тривалих обчислень (сотні ітерацій) чи до рішення задач, де ГН має обмежений вплив на результати. Окрім того, вони вимагають задання точного початкового положення, наприклад, для відсутніх зовнішніх дій, і це значно ускладнює задачу, коли початкове положення тіла невідоме. По-третє, існують дві ГН математичні моделі довгих гнучких тіл – балка і канат, причому відомо, що сильно розтягнута балка отримує властивості канату. Проте в літературі не вказуються межі їх окремого застосування, не описуються комбіновані методи, коли на деяких ділянках може застосовуватися менш трудомістка модель каната (наприклад внутрішні ділянки), а модель балки - на межах тіла чи в зонах контакту з іншими тілами.

Таким чином, актуальною є задача створення методів чисельного аналізу ГН одновимірних задач, які базувались би на точних аналітичних рішеннях моделей канату та простої, розтягнутої і стисненої криволінійної балки для елементарних базових ділянок, та розробки ефективного ітераційного процесу, що дозволяв би незалежну зміну положення кожної базової ділянки (геометрії) на заданій ітерації з наступним його уточненням за допомогою згладжувальних рішень (ЗР), що значно прискорить процес обчислень і зробить його незалежним від правильного вибору початкового положення.

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

Робота виконувалася на кафедрі прикладної математики Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Дослідження даної роботи проводились згідно з планами науково-дослідних робіт кафедри прикладної математики факультету прикладної математики:

- в рамках науково-дослідної роботи № 2310п “Інформаційно-аналітична система для математичного моделювання та управління соціальними ризиками з застосуванням у техніці та медицині” (номер державної реєстрації — 0120U102216).

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації одержано такі нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано метод базових розривних рішень (БР) та згладжувальних рішень. Метод є новим варіантом відомого коротаційного підходу, де БР є криволінійною ділянкою (елемент кола чи хелікса) і в цілому враховує ГН деформацію від значних внутрішніх сил та моментів, однак на відміну від існуючих методів БР є розривним. ЗР будується в локальних криволінійних координатах, є лінійним і незначним, згладжує БР та забезпечує

неперервність всіх параметрів і служить для уточнення БР на наступній ітерації. Процедура уточнення є динамічною, і шляхом корекції коефіцієнта уточнення враховує збіжність чи розбіжність результатів на двох послідовних ітераціях.

2. Відоме класичне рішення для ланцюгової лінії часто використовується в літературі як аналітичний елемент для розрахунків деформування канатів, як системи. Автором вперше отримано альтернативне аналітичне рішення для деформування канату, що представляє собою суму БР як ділянки кола та ЗР, що є рішенням диференційних рівнянь четвертого порядку; і яке, на відміну від ланцюгової лінії, дозволяє точно враховувати довільне видовження канату, тобто розглядати досить еластичні канати. Рішення отримано у вигляді, зручному для застосування методу початкових параметрів (МПП).

3. Для попередньо розтягнутої (або стисненої) ділянки кола під дією розподілених дотичних і нормальних навантажень вперше отримані точні аналітичні рішення диференційних рівнянь 6-го порядку в вигляді, зручному для застосування МПП. Додатково для забезпечення комп'ютерної збіжності формул на ділянках, що є майже прямими (кут дуги кола не перевищує 2°), вперше отримані розклади цих рішень в ряд Тейлора, і продемонстровано, що експоненціальні («розтягнуті») рішення співпадають з тригонометричними («стиснутими») рішеннями за характерного значення осьової сили.

4. Вперше запропоновано підхід до комбінованого спряження канату та балки, коли внутрішня частина тіла моделюється як канат, а біля границь використовується модель балки. Це дозволяє значно зменшити як кількість елементів, так і підвищити ефективність розрахунків, зокрема кількість необхідних ітерацій. Цей підхід базується на вперше сформульованих критеріях, за яких задане довге тіло з певними комбінаціями геометричних, фізичних і механічних його параметрів можна розглядатися як канат чи балка.

5. Вперше запропоновано базове рішення для тривимірного елемента як ділянки хелікса, всі геометричні параметри якого (базисні вектори, відносні положення точок) однозначно зв'язані з системою базисних глобальних моментів та характеристиками жорсткості січення, що дало змогу для деяких видів закріплення просторової балки навіть за відсутності ЗР забезпечити високу точність аналізу ГН деформування.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи

Значення результатів роботи полягає в наступному:

1. На прикладі канату, що підданий дії системи зосереджених сил, продемонстровані беззаперечні переваги коротаційних підходів, порівняно з популярним методом стрільби. Кортаційні підходи є стійкими при довільній кількості ділянок, інтенсивності сил, жорсткості січення канату, та його початковій довжині, в той час як метод стрільби починає розходитися для канатів великої довжини і великій кількості сил.

2. В усіх розглянутих задачах, методах і прикладах застосовується метод початкових параметрів як найбільш зручний метод організації і алгоритмізації розрахунків. В роботі доповнена його теорія і практика, особливо коли базові

ділянки є розривними, і власне рівняння спряження (умови на краях елементів) для ЗР забезпечують загальну нерозривність розв'язків.

3. Запропоноване комплексне поєднання балкових і канатних елементів, коли біля особливих точок застосовуються канатні, що на порядки спрощує розрахунки і при цьому дозволяє знаходити всі особливості і краєві ефекти.

4. Створений метод розрахунку ГН поведінки не вимагає задання початкової геометрії тіла. Це дає змогу проводити діагностичні дослідження конструкцій, початковий стан яких невідомий, а навантажений (деформований) стан задається за допомогою безпосередніх геодезичних вимірювань.

5. Розроблені методи є корисними для проведення сплайнів, коли задаються положення граничних точок, напрямки дотичних в них, та загальна довжина лінії. Тоді отримана запропонованим методом крива є оптимальною серед можливих за критерієм мінімуму енергії, що часто застосовується в геометричному проектуванні. Подібним чином отримані результати можуть застосовуватися для проектування гріпперів (захватів) для роботів та вибору їх довжини і властивостей жорсткості.

6. Приведені значення розрахункових переміщень, сил в табличній формі в вибраних точках можуть використовуватися для тестування інших програм та методик, адже на відміну від результатів приведених в літературі, вони отримані для екстремальних значень характеристик жорсткості, великого видовження і значної зміни форми.

7. Новий підхід до розрахунку ГН поведінки довгих елементів з використанням розривного БР та ЗР відкриває перспективи до створення розрахункових методів взагалі, і може мати потужний вплив на розробку новітніх розрахункових комплексів.

Результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри прикладної математики Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” в рамках нормативної магістерської дисципліни “Моделювання складних систем”.

5. Апробація/використання результатів дисертації

Результати та основні положення роботи подавалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Міжнародна наукова конференція ”Сучасні проблеми механіки та математики - 2023”. Львів, Інститут прикладних проблем механіки і математики. 23-25 травня, 2023.
- Міжнародна наукова конференція “Актуальні проблеми механіки”. 14-16 листопада, 2023 Інститут механіки імені С. П. Тимошенка НАН України;
- Всеукраїнська наукова конференція. “Сучасні проблеми прикладної математики та комп'ютерних наук”, 7–9 листопада 2023, Львів, АРАМС-2023.

6. Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Мазурика Р. В. визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 10 наукових публікацій, у тому числі:

- 4 статті які включено до списку міжнародної наукометричної бази Scopus з квантилями Q1 [1]; Q1 [2]; Q3 [3]; Q4 [4] відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports;
- 1 стаття у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 113 Прикладна математика; в т.ч. 1 стаття у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб;
- 5 тез виступів на наукових конференціях.

Статті:

1. Orynyak I., Mazuryk R., Oryniak A. (2020). Basic (Discontinuous) and Smoothing-Up (Conjugated) Solutions in Transfer-Matrix Method for Static Geometrically Nonlinear Beam and Cable in Plane. Journal of Engineering Mechanics. Vol. 146, Issue 5 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001753](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001753) (Scopus, WOS, Q1)

Здобувачем розроблено рівняння спряження та алгоритм для методу базових і поправочних рішень; для майже прямих ділянок проведені розклади рішень в ряд Тейлора; підготовлені приклади та проведені розрахунки для них, досліджена ефективність введених параметрів уточнення.

2. Orynyak I., Mazuryk R. (2022). Application of method of discontinuous basic and enhanced smoothing solutions for 3D multibranch cable. Engineering Structures Volume 251, Part B, 15 January 2022, 113582 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113582> (Scopus, WOS, Q1)

Здобувачем отримані рівняння спряження для багатоелементних вузлів і алгоритм рішення системи, підготовлені приклади і проведені їх розрахунки.

3. Orynyak I, Guarracino F., Mazuryk R., Modano M. (2022) An efficient iteration procedure for form finding of slack cables under concentrated forces. Archives of Civil Engineering, 2022, 68(2): 645-663 <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140664> (Scopus, WOS, Q4)

Здобувачем сформульована процедура ітераційних обчислень та процедури уточнення, підготовлені приклади та розрахунки для них.

4. Orynyak I., Koltsov D., Chertov O., Mazuryk R. Application of beam theory for the construction of twice differentiable closed contours based on discrete

noisy points. System research and information technologies. 2022, N4. doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.4.10 (Scopus, WOS, Q4)

Здобувачем реалізований МПП та процедура ітераційного уточнення параметрів розрахункової системи для коротацийних балкових сплайнів.

5. Orynyak I, Kulyk K, Mazuryk R. Analysis of geometrically nonlinear deformation of 3D beams by the method of basic helical elements. *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* 2023. – 66, № 1-2. – С. 5–28. –Бібліогр.: 24 назв. Кат А.

Здобувачем отримані рівняння для базового рішення МПП.

Матеріали конференцій:

1. Ориняк І., Кольцов Д., Мазурик Р. (2023). Порівняння плоских балкового коротацийного сплайну і геометрично нелінійної балки. Міжнародна наукова конференція "Сучасні проблеми механіки та математики - 2023" , Львів. Збірник наукових праць / за заг. ред. акад. НАН України Р.М. Кушніра та чл.-кор. НАН України В.О. Пелиха [Електронний ресурс] // Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – 2023. – 454 с. С. 393-394.

Здобувачем проведено розрахунки прикладів геометрично нелінійних систем, розраховано якість їх кривих.

2. Ориняк І., Мазурик Р. Метод базових (розривних) та поправочних розв'язків для геометрично нелінійного аналізу балок та канатів. Там же. С. 85-86.

Здобувачем представлено техніка реалізації методу, підготовлені приклади і досліджено вплив натягу на збіжність розрахунків.

3. Ориняк І., Кулик К., Мазурик Р. Аналіз геометрично нелінійного деформування 3D балок методом базових хеліксних ділянок. Там же. С. 79-80.

Здобувачем представлено просторовий алгоритм уточнення для методу базових і поправочних рішень, підготовлені приклади розрахунків.

4. Ориняк І. В., Мазурик Р. В. (2023). Моделювання плоских канатів з врахуванням їх жорсткості на вигин методом розривних базових та згладжувальних рішень. Матеріали Міжнародної наукової конференції "Актуальні проблеми механіки" до 145-річчя від дня народження С.П. Тимошенка, 14-16 листопада. [Електронний ресурс] // Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України – 2023. – 469 с. С. 385-386.

Здобувачем досліджені приклади ГН систем, і вплив різних величини натягу на швидкість збіжності результатів.

5. Ориняк І. В., Мазурик Р. В. (2023). Комбіноване застосування моделей геометрично нелінійної балки та канату для довгих розтягнутих конструкцій. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції. "Сучасні проблеми прикладної математики та комп'ютерних наук", 7 – 9 листопада 2023, Львів, АРАМС-2023 // Львівський національний університет імені Івана Франка – 250 с. С 169-173.

Здобувачем проведено розрахунки прикладів геометрично нелінійних змішаних балково-канатних систем.

Якість та кількість публікацій відповідають “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Мазурика Р. В. “Метод базових та згладжувальних рішень для аналізу статичної деформації геометрично-нелінійних одновимірних систем”, що подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика за своїм науковим рівнем, новизною отриманих результатів, теоретичною та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам, що пред’являють до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КПП ім. Ігоря Сікорського Прикладна математика зі спеціальності 113 Прикладна математика.

РЕКОМЕНДУВАТИ:

1. Дисертаційну роботу “Метод базових та згладжувальних рішень для аналізу статичної деформації геометрично-нелінійних одновимірних систем”, подану Мазуриком Романом Володимировичем на здобуття наукового ступеня доктора філософії, до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

2. Вченій раді КПП ім. Ігоря Сікорського утворити разову спеціалізовану вчену раду у складі:

Голова:

Д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп’ютерної графіки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” **Вірченко Геннадій Анатолійович**

Члени:

Рецензенти:

Д-р. фіз.-мат наук, професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” **Янчевський Ігор Владиславович.**

Канд. техн. наук, доцент кафедри математичного моделювання та аналізу даних Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” **Хайдуров Владислав Володимирович.**

Опоненти:

Д-р. фіз.-мат наук, заступник директора з наукової роботи Інституту прикладних проблем механіки і математики НАН України **Токовий Юрій Владиславович.**

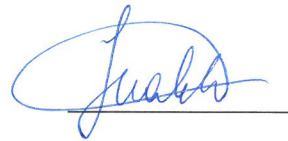
Д-р. техн. наук, професор кафедри будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури **Максим'юк Юрій Всеволодович.**

Завідувач кафедри
прикладної математики
д-р. техн. наук, професор



Олег ЧЕРТОВ

Учений секретар
кафедри прикладної математики,
канд. техн. наук



Данило ТАВРОВ