

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Кривого Ярослава Вячеславовича
на тему: «Подієво-орієнтована мікросервісна архітектура масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу», що подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

Дисертація Кривого Ярослава Вячеславовича
«Подієво-орієнтована мікросервісна архітектура масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, виконана на кафедрі програмної інженерії математичного факультету Запорізького національного університету. Тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Запорізького національного університету (протокол № 7 від 27.01.2026).

1. Актуальність теми дослідження

Метод скінченних елементів є одним із базових чисельних методів розв'язання крайових задач математичної фізики та широко застосовується у механіці деформівного твердого тіла, теплопровідності, гідродинаміці, електромагнетизмі та інших напрямках інженерного й наукового моделювання. Сучасний скінченно-елементний аналіз охоплює не лише безпосереднє чисельне розв'язання, а повний обчислювальний цикл, що включає підготовку геометрії, генерацію сітки, задання математичної моделі, складання та розв'язання системи алгебраїчних рівнянь, післяобробку, зберігання і візуалізацію результатів.

Зростання деталізації геометричних моделей, розмірності скінченно-елементних сіток і кількості незалежних обчислювальних задач призводить до збільшення вимог до продуктивності програмного забезпечення, обсягів проміжних даних і тривалості виконання. Особливої актуальності набуває виконання пакетів задач у параметричних дослідженнях, оптимізації, верифікації чисельних моделей і навчальних або дослідницьких обчислювальних експериментах.

Традиційні Finite Element Analysis (FEA) системи переважно реалізуються як інтегровані монолітні програмні комплекси. Така організація є зручною для локального використання, однак ускладнює незалежне масштабування найбільш ресурсомістких стадій, асинхронне виконання довготривалих задач, інтеграцію з хмарними середовищами та незалежне оновлення окремих алгоритмічних компонентів. Масштабування всього

програмного комплексу заради збільшення продуктивності лише чисельного розв'язувача може призводити до нераціонального використання ресурсів.

Мікросервісна архітектура створює передумови для декомпозиції повного FEA-циклу на автономні компоненти з чітко визначеними межами відповідальності та контрактами взаємодії. Водночас сам факт поділу системи на сервіси не гарантує підвищення продуктивності, оскільки розподілене середовище створює додаткові витрати на мережеву взаємодію, серіалізацію повідомлень, узгодження станів і передавання великих обчислювальних артефактів.

Для задач скінченно-елементного аналізу важливим є розділення керівного та обчислювального потоків. Події доцільно використовувати для передавання ідентифікаторів задач, статусів, часових міток і посилань, тоді як геометричні моделі, сітки, постановки, чисельні розв'язки та пакети візуалізації мають зберігатися у спеціалізованому об'єктному сховищі. Такий підхід зменшує навантаження на брокер повідомлень, послаблює зв'язність компонентів і створює умови для відтворюваності обчислень.

Подієво-орієнтована взаємодія дозволяє відокремити момент створення задачі від її фактичного виконання, організувати асинхронне проходження стадій і передавання користувачеві проміжних станів. Окремого дослідження потребує незалежне горизонтальне масштабування обчислювальної стадії, оскільки практичний ефект від збільшення кількості виконавців залежить від складності задачі, частки корисних чисельних обчислень у загальній затримці та доступних ресурсів фізичного середовища.

Важливим аспектом оцінювання масштабованої FEA-платформи є збереження чисельної коректності. Зміна кількості обчислювальних виконавців, порядку надходження задач і рівня паралельності не повинна впливати на параметри сітки, характеристики чисельного поля та похибки розв'язку. Тому продуктивність розподіленої платформи доцільно оцінювати разом із відтворюваністю контрольних чисельних показників.

Отже, дисертаційне дослідження, спрямоване на розроблення подієво-орієнтованої мікросервісної архітектури масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу, є актуальним. Воно поєднує архітектурне проєктування, реалізацію повного обчислювального конвеєра та експериментальне визначення умов ефективного горизонтального масштабування без порушення чисельної коректності результатів.

2. Наукова новизна, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає в таких положеннях:

Вперше розроблено архітектурну модель подієво-орієнтованої мікросервісної FEA-платформи, у якій повний обчислювальний цикл логічно поділено на окремі мікросервіси, відокремлено канали передавання керівних

подій, службових та великих обчислювальних даних, а також визначено правила й формати взаємодії між компонентами системи, що дає змогу незалежно змінювати обчислювальну потужність окремих стадій без перебудови решти платформи.

Вперше для FEA-платформ експериментально встановлено, що розмежування функцій координації подій і виконання ресурсоемних чисельних задач між незалежними компонентами забезпечує відтворюваність чисельних результатів при зміні кількості обчислювальних виконавців, що дає змогу розглядати горизонтальне масштабування як математично нейтральну операцію щодо точності розв'язку.

Отримали подальший розвиток методи оцінювання масштабованості розподілених обчислювальних платформ шляхом включення до складу показників пропускної здатності, наскрізної затримки та її статистичних параметрів, тривалостей окремих стадій конвеєра і часу роботи розв'язувача, що дає змогу комплексно характеризувати ефективність горизонтального масштабування платформи.

Уточнено закономірності впливу обчислювальної складності скінченно-елементної задачі на ефективність горизонтального масштабування розподіленої FEA-платформи: встановлено непропорційний характер масштабування і визначено частку часу чисельного розв'язання в повній наскрізній затримці як визначальний критерій вибору кількості обчислювальних виконавців, що дає змогу обґрунтовано планувати ресурси платформи та уникати надлишкового виділення обчислювальних потужностей.

Теоретичне значення отриманих результатів полягає в розвитку наукових засад побудови та оцінювання розподілених платформ скінченно-елементного аналізу. Розроблена архітектурна модель визначає принципи логічного поділу повного FEA-циклу між окремими мікросервісами, відокремлення каналів передавання керівних подій, службових і великих обчислювальних даних, а також правила й формати взаємодії між компонентами платформи. Експериментально встановлено, що розмежування функцій координації подій і виконання ресурсоемних чисельних задач забезпечує відтворюваність чисельних результатів при зміні кількості обчислювальних виконавців, що обґрунтовує математичну нейтральність горизонтального масштабування щодо точності розв'язку. Подальшого розвитку набули методи оцінювання масштабованості розподілених обчислювальних платформ шляхом комплексного врахування пропускної здатності, наскрізної затримки та її статистичних параметрів, тривалості окремих стадій конвеєра і часу роботи розв'язувача. Уточнено залежність ефективності горизонтального масштабування від обчислювальної складності FEM-задачі та визначено частку часу чисельного розв'язання в повній наскрізній затримці як критерій вибору кількості обчислювальних виконавців.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні працездатного прототипу подієво-орієнтованої мікросервісної FEA-

платформи, у якому реалізовано повний цикл оброблення задачі: формування сітки, чисельне розв'язання, післяоброблення, зберігання даних, відстеження стану та браузерну тривимірну візуалізацію. Запропонована архітектура дає змогу незалежно змінювати обчислювальну потужність окремих стадій без перебудови інших компонентів платформи. Розмежування координації подій і виконання чисельних задач забезпечує керовану зміну кількості обчислювальних виконавців зі збереженням відтворюваності результатів. Розроблені методи оцінювання можуть бути використані для комплексного визначення ефективності горизонтального масштабування подібних розподілених платформ. Встановлена залежність ефективності масштабування від складності FEM-задачі та визначений критерій вибору кількості виконавців дають змогу обґрунтовано планувати ресурси платформи й уникати надлишкового виділення обчислювальних потужностей. Визначені правила та формати взаємодії між компонентами можуть бути використані під час розширення платформи новими математичними постановками, чисельними розв'язувачами та засобами візуалізації.

3. Публікації, у яких висвітлено основні наукові результати дисертації, та повнота опублікування

1) Кривий Я. В., Лісняк А. О. Мікросервісна архітектура систем скінченно-елементного аналізу. *Computer Science and Applied Mathematics*. 2024. № 1. С. 75–83. DOI: 10.26661/2786-6254-2024-1-09.

2) Kryvyi Y., Lisnyak A. Event-Driven Microservice Architecture for Scalable Finite Element Analysis Platforms. *Computer Design Systems. Theory and Practice*. 2026. Vol. 8, No. 1. P. 56–69. DOI: 10.23939/cds2026.01.056.

3) Кривий Я. В., Лісняк А. О. Подієво-орієнтована мікросервісна архітектура масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу: розробка та експериментальна оцінка. *Computer Science and Applied Mathematics*. 2026. № 1. С. 120–141. DOI: 10.26661/2786-6254-2026-1-13.

4) Кривий Я. В., Лісняк А. О. Експериментальна оцінка масштабування подієво-орієнтованого FEA-конвеєра у 3D сценарії. Актуальні проблеми математики та інформатики : збірка тез доповідей Сімнадцятої Всеукраїнської, двадцять четвертої регіональної наукової конференції молодих дослідників (м. Запоріжжя, 23–24 квітня 2026 р.). Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2026. С. 50–54.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні системного аналізу предметної області та існуючих FEA-рішень, формуванні функціональних і нефункціональних вимог, розробленні подієво-орієнтованої мікросервісної моделі платформи, UML- та IDEF0-моделей, API-, подієвих і артефактних контрактів, проєктуванні та програмній реалізації експериментального прототипу, реалізації двовимірного й тривимірного FEM-розв'язувача, розгортанні компонентів у Kubernetes, розробленні методів

експериментального оцінювання, проведенні обчислювальних експериментів, статистичній інтерпретації отриманих результатів та розробленні рекомендацій щодо вибору кількості обчислювальних виконавців.

Повнота опублікування результатів дисертації засвідчується таблицею 1.

Таблиця 1 – Повнота опублікування результатів дисертації

№	Наукова публікація здобувача		Підрозділи дисертації, що висвітлюються
	Назва	Видання	
Наукові фахові видання України			
1.	Мікросервісна архітектура систем скінченно-елементного аналізу	<i>Computer Science and Applied Mathematics.</i> 2024. № 1. С. 75–83.	1.1–1.4; 2.1
2.	Event-Driven Microservice Architecture for Scalable Finite Element Analysis Platforms	<i>Computer Design Systems. Theory and Practice.</i> 2026. Vol. 8, No. 1. P. 56–69.	2.1–2.6; 3.1; 3.3–3.4
3.	Подієво-орієнтована мікросервісна архітектура масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу: розробка та експериментальна оцінка	<i>Computer Science and Applied Mathematics.</i> 2026. № 1. С. 120–141.	3.1–3.9; 4.1–4.10
Матеріали апробації результатів дисертації			
4.	Експериментальна оцінка масштабування подієво-орієнтованого FEA-конвеєра у 3D сценарії	<i>Матеріали конференції «Актуальні проблеми математики та інформатики».</i> Запоріжжя, 2026. С. 50–54.	3.7–3.8; 4.4–4.10

4. Відповідність вимогам щодо оформлення дисертації

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленої кваліфікаційної наукової праці на правах рукопису, виконаної здобувачем особисто. У роботі наведено науково обґрунтовані результати проведених досліджень, що мають теоретичне та практичне значення для розвитку архітектурних засад побудови, методів оцінювання та підходів до масштабування розподілених систем чисельного моделювання. Самостійність і достовірність результатів підтверджуються публікаціями, у яких висвітлено основний зміст дисертації, а також апробацією результатів на науковій конференції.

Дисертація має логічну структуру та характеризується єдністю змісту. Матеріал послідовно розкриває перехід від аналізу теоретичних і прикладних передумов до концептуального проєктування, програмної реалізації та експериментальної перевірки запропонованої архітектури. Текст викладено українською мовою у науковому стилі; таблиці, рисунки, формули та бібліографічні посилання використовуються для обґрунтування отриманих результатів.

Дисертацію оформлено відповідно до Вимог до оформлення дисертації, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40, у чинній редакції зі змінами, внесеними наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 № 759.

За актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю, теоретичною та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам, передбаченим пунктом 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 зі змінами, внесеними Постановою Кабінету Міністрів України № 507 від 03.05.2024).

ВИСНОВОК

Ознайомившись із представленою дисертацією Кривого Ярослава Вячеславовича «Подієво-орієнтована мікросервісна архітектура масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу» та науковими публікаціями, у яких висвітлено основні результати дослідження, вважаємо, що:

1) Дисертація Кривого Ярослава Вячеславовича є актуальним, завершеним і самостійно виконаним науковим дослідженням, присвяченим розв'язанню науково-прикладного завдання підвищення масштабованості та керованості програмної платформи скінченно-елементного аналізу. Робота характеризується єдністю змісту, логічністю побудови та послідовним переходом від теоретичного обґрунтування до архітектурного проєктування, програмної реалізації й експериментальної перевірки отриманих результатів.

2) У дисертації отримано наукові результати, яким властиві наукова новизна, теоретичне та практичне значення. Вперше розроблено архітектурну модель подієво-орієнтованої мікросервісної FEA-платформи з логічним поділом повного обчислювального циклу між окремими мікросервісами, відокремленням каналів передавання керівних подій, службових і великих обчислювальних даних та визначеними правилами й форматами взаємодії компонентів. Вперше для FEA-платформ експериментально встановлено відтворюваність чисельних результатів при зміні кількості обчислювальних виконавців за умови розмежування функцій координації подій і виконання ресурсоемних чисельних задач. Подальшого розвитку набули методи

оцінювання масштабованості розподілених обчислювальних платформ, а також положення щодо залежності ефективності горизонтального масштабування від обчислювальної складності FEM-задачі.

3) Практичним результатом роботи є працездатний прототип подієво-орієнтованої мікросервісної FEA-платформи, що забезпечує формування сітки, чисельне розв'язання, післяоброблення, зберігання даних, відстеження стану, браузерну тривимірну візуалізацію та незалежне масштабування обчислювальної стадії. За результатами експериментального дослідження визначено залежність ефективності масштабування від складності FEM-задачі та обґрунтовано використання частки часу чисельного розв'язання в повній наскрізній затримці як критерію вибору кількості обчислювальних виконавців. Сформульовані рекомендації дають змогу обґрунтовано планувати ресурси платформи та уникати надлишкового виділення обчислювальних потужностей.

4) Основні наукові результати дисертації достатньо повно висвітлено у трьох статтях у наукових фахових виданнях і матеріалах наукової конференції. Особистий внесок здобувач охоплює аналіз предметної області, архітектурне проектування, програмну реалізацію платформи, реалізацію чисельних методів, розроблення методики експериментального оцінювання, проведення обчислювальних експериментів, статистичну інтерпретацію їх результатів та розроблення рекомендацій щодо вибору кількості обчислювальних виконавців.

5) Дисертація Кривого Ярослава Вячеславовича «Подієво-орієнтована мікросервісна архітектура масштабованої платформи скінченно-елементного аналізу» відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, та може бути рекомендована до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології.

Головуючий на засіданні кафедри:

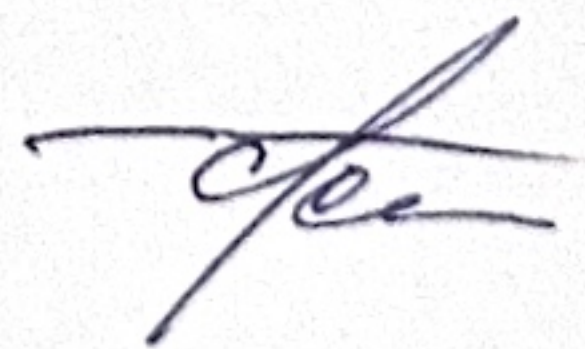
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри фундаментальної
та прикладної математики
Запорізького національного університету



С.М. Гребенюк

Член експертної групи:

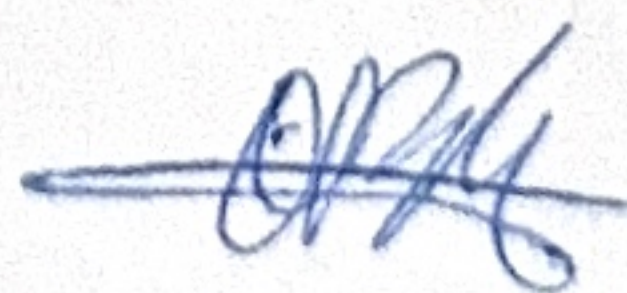
доктор технічних наук, професор,
декан математичного факультету
Запорізького національного університету



С.І. Гоменюк

Член експертної групи:

Кандидат технічних наук,
доцент, доцент кафедри програмної інженерії
Запорізького національного університету



О.В. Кудін

« 18 » серпня 2026 р.