

## ВДГУК

на дисертацію **Берчуна Ярослава Олександровича**  
**„Математичне та експериментальне моделювання протяжних систем”,**

що представлена

на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань «Математика та статистика» за спеціальністю 113 - «Прикладна математика»

Рукопис дисертаційної роботи, що розглядається, включає вступ, чотири розділи та висновки, присвячені розробці обчислювальних методів та алгоритмів, математичному моделюванню та експериментальній діагностиці протяжних систем (ПС). Окрім того, в роботі наведено два додатки (А і Б), в додатку А підтверджується впровадження результатів дисертаційної роботи. Окремо подано умовні скорочення та список літературних джерел, що використані в роботі, включаючи і публікації автора за результатами досліджень. Робота викладена на 179 сторінках, включаючи графіки, таблиці, розрахункові схеми та фото, що пояснюють текст дисертації. Основна частина роботи наведена на 130 сторінках. Загалом, побудова дисертації, її об'єм та наповнення відповідає вимогам МОН України. В цілому немає зауважень до побудови роботи та об'єму рукопису дисертації.

**Актуальність роботи.** Широке застосування протяжних систем та їх велике значення у надійності технічних систем і споруд різного призначення обумовлює важливість вибраної тематики дослідження. Не дивлячись на те, що цією тематикою вже багато років займаються провідні вчені країн в усьому світі, досі відкритими залишаються багато питань щодо особливостей їх поведінки: проблеми в діагностуванні цілісності паль (каверни, шийки, розширення тощо), петлеутворення в ПС у різному середовищі, правильний вибір коефіцієнта динамічності, у разі складних маневрів буксирувальника тощо. Окремим питанням, що вимагає досліджень щодо побудови алгоритмів розпаралелювання і паралельних обчислень, є врахування багатохвильового характеру розповсюдження збурень в ПС. Традиційні обчислення напружено-деформованого стану (НДС) ПС на основі спрощених математичних моделей часто призводять до відсутності збіжності обчислювальних алгоритмів або до неправильних висновків під час інтерпретації результатів моделювання. Сучасні ж досягнення у сфері паралельних обчислень на основі систем GPU та TPU, які дозволяють у десятки разів прискорити швидкість розрахунків, роблять актуальним максимальне їх розпаралелювання.

Задача ускладнюється й тим, що активні експерименти з випробування нових конструкцій та матеріалів за умов сучасної досить щільної забудови є практично неможливими. У то же час, недостатня розробленість нелінійних хвильових динамічних математичних моделей залізобетонних паль (ЗП), чисельних методів розрахунку НДС протизсувних споруд (ПЗС) та ЗП

призводить до того, що вимоги будівельних норм не завжди виконуються. Крім того, вкрай обмеженими є можливості експериментальних приладів визначення технічного стану (ТС) ПЗС та ЗП, алгоритми роботи яких базуються на математичних моделях досліджуваних будівельних конструкцій та матеріалів, з яких вони виготовлені. Обмеженими є можливості коректного розрахунку запасу стійкості ПЗС та ЗП, математичного моделювання різних сценаріїв активізації геодинамічних процесів та оцінювання відповідної реакції будівельних конструкцій на цю активізацію. Як наслідок, кількість зсувних аварій та катастроф будівельних конструкцій і споруд, основу яких складають розподілені у просторі ПС, постійно збільшується разом із відповідними навантаженнями на бюджети різних рівнів. Наприклад, останнім часом суттєво активізувались подібні проблеми у м. Одеса та ін.

Саме таким недостатньо вивченим процесам і присвячена робота здобувача. Отже, **актуальність теми дослідження не викликає сумнівів.**

### ***Побудова роботи та основні положення, що зафіксовані в окремих розділах дисертації***

***У вступній частині*** (с.15...23) стисло викладені основні положення роботи, як того вимагає ДАК МОН України. Підкреслимо, що дана робота виконана в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національній академії наук України (ІТГП НАНУ). Результати, що отримано під час виконання роботи, є складовою частиною досліджень, які проводилися в межах науково-дослідної роботи ІТГП НАНУ «Дослідження асиміляційного потенціалу поверхневих вод, геологічного середовища та приземної атмосфери в умовах техногенезу» (№ держреєстрації 0113U004982). Особливо цінним є те, що автор брав участь у розробленні Настанови (державного будівельного нормативного документу України) ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 Державним підприємством “Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій”, що підтверджується наявністю його імені серед його співрозробників (<https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/08/V1146.pdf>). Тема дисертації відповідає актуальним напрямкам науково-технічної політики України, визначеним у статті 45 Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність» (редакція від 16.07.2019, підстава - 2704-VIII). **Тому щодо поставленої мети та завдань в роботі зауважень немає.**

***Розділ 1*** (с.24...45) присвячений критичному аналізу сучасного стану досліджень математичних моделей, методів розрахунку та експериментів з розподіленими ПС. Поставлено задачі досліджень, зазначено основні передумови застосування багатохвильових моделей для дослідження НДС ПС та ЗП як технічного стану різновиду ПС з можливістю визначення дефектів різних типів. Наведено огляд теоретичних та експериментальних досліджень

різних аспектів дефектів у ЗП, що виникають у процесі їх виготовлення на будівельному майданчику.

Практичний досвід свідчить, що дефекти в ЗП можуть виникнути, навіть у разі повного дотримання технології їхнього виробництва. Можливі дефекти у стовбурі буронабивних паль: тріщини, каверни, шийки, розриви. Розуміючи важливість максимально точного діагностування таких дефектів у ЗП, здобувач уточнює постановку задачі, пропонуючи застосовувати багатохвильові моделі ПС, вдосконалювати методи їх розрахунку на основі розпаралелювання обчислювальних алгоритмів, монотонізації чисельного профілю та ін. Комплексна оцінка стану чисельно-теоретичних досліджень НДС ПС доповнюється аналізом експериментальних методів їх діагностики. Такий комплексний розгляд проблеми, що досліджується, надає можливість здобувачу поставити конкретні завдання, що дають можливість глибше розкрити складні багатохвильові процеси в ПС (ЗП) та покращити діагностування їх технічного стану (ТС) з урахуванням багатохвильових моделей при чисельному моделюванні (див. п. 1.4).

В цілому **до даного розділу особливих зауважень немає.**

*У Розділі 2* (с.46...93) за допомогою аксіоматичного підходу Бернуллі та Ейлера для криволінійного стрижня з постійними характеристиками поперечного перерізу розроблено чотиримодову модель ПС у полі масових та поверхневих сил, що описують шість хвиль чотирьох типів: поздовжню, крутильну, конфігураційні (поперечні; дві) і згинальні (дві). У сукупності з певними граничними і початковими умовами модель може застосовуватись для технічного діагностування ПЗС (ЗП), оцінювання їх цілісності та уточнення несучої здатності, розрахунку НДС тощо.

Побудована тримодова модель нелінійної динаміки поздовжньо деформованої ПС. Вона враховує поздовжні і конфігураційні (дві) хвилі в напрямку нормалі і бінормалі, а також хвилю «крутіння».

Наведено доказ теореми про коректність задачі Коші для отриманих моделей ПС і особливості застосування методу скінченних різниць (МСР) для вирішення нелінійних динамічних задач з визначення нестационарного НДС ПС у просторі та ЗП у ґрунті. Коректність застосування різницевої схем (РС) перевірялась на грубій сітці (крок за часом становив  $\Delta t=0,2$ , за Лагранжевою координатою  $\Delta S=30$  м) та подрібненій у два рази (крок за часом становив  $\Delta t=0,1$ , за Лагранжевою координатою  $\Delta S=15$  м).

Приділено увагу розпаралелюванню обчислень багатохвильової динаміки ПС. Метод розпаралелювання за хвильовими швидкостями незначно впливає на точність визначення параметрів поздовжніх хвиль. Показано, що при обчисленнях за рахунок різного ступеня розпаралелювання поздовжніх і поперечних хвиль можна домогтися збільшення швидкості обчислень більше, ніж у 10 разів, у порівнянні з алгоритмом хвильової факторизації і до 100 ~ 1000 разів – у порівнянні з розв'язанням повної системи рівнянь, не скорочуючи при цьому діапазон стійкого рахунку.

*У розділі 3* (с.94...114) розроблені і проаналізовані методи чисельного моделювання нелінійних граничних задач статички і динаміки протяжних ПЗС, застосування МСР для моделювання хвильових процесів у ЗП, пов'язаних з діагностуванням їх ТС (цілісності стовбура палі, що безпосередньо впливає на їх несучу здатність, тощо). Чисельне моделювання згинальних та зсувних хвиль у ЗП, за поперечного удару по її торцю, дало позитивні результати стосовно можливості прогнозування місцезнаходження таких дефектів, як порожнеча, тріщини, шийки тощо, шляхом чисельного моделювання та ідентифікації розповсюдження та відображення хвиль різного типу в ЗП.

Проаналізовані можливості застосування методу скінченних елементів (МСЕ), що реалізовані в програмному комплексі LIRA, для чисельного моделювання динамічного впливу на НДС ПЗС. Такий динамічний вплив відображає реальні умови роботи пальових ПЗС в сейсмоактивних регіонах України, а також, у разі їх розташування біля джерел додаткових техногенних впливів (залізничні та автомобільні магістралі, кар'єри корисних копалин, де проводяться регулярні промислові вибухи тощо).

Для коректного науково-технічного супроводу залізничних ПЗС важливо виявити деформації цих споруд на ранній стадії, щоб уникнути зупинки руху залізничного транспорту та економічних збитків, які з цим можуть бути пов'язані. Проведено математичне моделювання НДС залізничної ПЗМ МСЕ: побудовано кінцево-елементну графічну модель залізничної ПЗС на перегоні Завалля-Неполоківці Чернівецької дистанції колії Львівської залізниці та проведено чисельне моделювання її НДС для нестационарних граничних умов. Граничні умови одночасно моделюють динамічний вплив від руху потягів та підвищеної сейсмічної активності регіону.

*У розділі 4* (с.115...148) проаналізовано підсумковий документ ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 «Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд», який увібрав у себе всі основні методичні вказівки та розробки з науково-методологічного обґрунтування, проектування та експериментального відпрацювання моніторингових систем в будівництві, у т.ч. ряд рекомендацій здобувача. Документ здобувачем адаптовано до вимог щодо документації Міжнародної федерації бетону (fib).

У лютому 2017 р. здобувачем проведено моніторинг улаштування палі глибиною 40 м діаметром **Ø820 мм** на будівельному майданчику по вул. Пимоненка у м. Києві. Моніторингові вібродинамічні дослідження проводились з метою визначення рівня віброприскорень (за трьома напрямками) динамічного впливу на житловий будинок, у разі влаштування буронабивної палі Ø820 мм. Найменша відстань до будинку від місця проведення бурових робіт складала приблизно 18-20 м. Вібродатчики розміщувались на фундаментній частині будівлі (3 вібродатчики) та на рівні верхнього 9-го поверху (2 вібродатчики) (місця розташування вібродатчиків

представлені на рисунках). Проведено аналіз отриманих експериментальних даних. Наведено графіки віброприскорень вибірково для максимальних значень. Максимальні значення віброприскорень зафіксовані та виділені кольором для кожного найменування робіт під час буріння свердловини. Для фундаментної частини будівлі за всіма напрямками вони не перевищували значення  $0,020 \text{ м/с}^2$ , для верхньої частини будівлі на рівні 9-го поверху віброприскорення не перевищували  $0,004 \text{ м/с}^2$ .

**Загальні висновки** по роботі викладені на с.149...151. Вони стислі і відповідають виконаним дослідженням.

**Список використаної літератури** (с.152...172) включає 221 літературне джерело. У списку переважають сучасні видання, матеріали міжнародних конференцій світового і європейського рівнів. На всі джерела в тексті дисертації є посилання.

**Додаток А** (с.173...174) – це довідка, що підтверджує впровадження результатів роботи.

**Додаток Б** (с.175...179) – наведено список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

Таким чином, **структура дисертації, порядок виконаних досліджень, висновки по роботі, рекомендації автора і їх реалізація на практиці повністю відповідають завершеній науково-дослідній роботі**, що має таку характеристику:

**Наукова новизна** полягає у тому, що вперше розроблена нелінійна гіперболічна чотиримодова математична модель ПС та доведено її коректність для окремих випадків, вперше розроблено метод розпаралелювання обчислень за швидкостями розповсюдження хвиль динаміки ПС, дістало подальшого розвитку математичне моделювання НДС ЗП та ПЗС за розподілених та концентрованих динамічних впливів різної інтенсивності та величини.

**Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій** Обґрунтованість результатів досліджень забезпечується коректністю використаних математичних доказів та виведень під час розгляду основних наукових положень. Розроблені методи та алгоритми ґрунтуються на фундаментальних засадах і не суперечать їм. Достовірність наукових результатів підтверджує високий ступінь збігу результатів з експериментальними даними.

**Практична цінність роботи** полягає у використанні результатів роботи у новоствореному нормативному документі України «Настанова щодо

науково-технічного моніторингу будівель і споруд: ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016» (Наказ Мінрегіону № 185 від 24.04.2016, введено в дію в будівельній галузі України з 01.04.2017), в обґрунтуванні теоретичної можливості створення нового класу приладів для діагностування залізобетонних паль у ґрунті з можливістю визначення дефектів, які раніше коректно не діагностувалися, та у розробці прикладних програм для реалізації запропонованих у роботі методів та алгоритмів.

**Повнота відображення основних положень дисертації у виданих роботах.** Основні положення та результати дисертаційної роботи розкрито в опублікованих 15 наукових роботах, з яких 6 – у фахових виданнях з переліку МОН України (див. список літератури), 4 – статті та матеріали доповідей, що проіндексовані у наукометричній базі Scopus; 3 – статті, що проіндексовані у наукометричній базі Index Copernicus; одна стаття – у міжнародному періодичному виданні. Здобувач є співавтором доповідей на українських та міжнародних конференціях, де знайшли відображення його наукові напрацювання. Оцінюючи його професійну підготовку за дискусіями на конференціях, опануванням усіх компетентностей та програмних результатів навчання за освітньо-науковою програмою за спеціальністю 113 «Прикладна математика» галузі знань 11 «Математика та статистика», підтверджую, що Берчун Я. О. сформувався як молодий здібний науковець.

**Автореферат** за змістом відповідає тексту дисертації, основні висновки по роботі ідентичні. Його об'єм – 20 сторінок. Щодо змісту автореферату в порівнянні з текстом дисертаційної роботи ***зауважень немає.***

**Оформлення дисертації та автореферату** відповідає чинним вимогам МОН України. Дисертаційна робота та автореферат складені державною мовою, матеріал викладено професійно, добре проілюстровано.

**Відсутність порушення академічної доброчесності.** У дисертації та авторефераті відсутні порушення академічної доброчесності.

Додатково можна зробити такі загальні зауваження до роботи:

1. Пункти 4 і 5 наукової новизни результатів дослідження мають більше практичну, аніж наукову цінність, як для даної спеціальності.
2. Під час випробування ефективності запропонованого методу розпаралелювання обчислень варто було провести дослідження їх пришвидшення з використанням Python та сучасних GPU (графічних процесорів). Можливо, це дозволило б досягти ще більшого прискорення обчислень та дало можливість б створити більш ефективний інструментарій для подальшого впровадження результатів роботи (підрозд. 2.2 дисертації).

3. Виконані натурні експериментальні роботи мали б більшу цінність, якби були б досліджені можливі зміни фізико-механічних показників ґрунтів.
4. Було б доцільно навести блок-схеми розроблених алгоритмів.

Наведені зауваження *не впливають в цілому на отримані результати та зроблені висновки.*

На основі детального розгляду роботи вважаю, що дисертація **Берчуна Ярослава Олександровича „Математичне та експериментальне моделювання протяжних систем”** відповідає чинним вимогам МОН України, а її автор **заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика».**

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри системного аналізу,  
комп'ютерного моніторингу та  
інженерної графіки Вінницького  
національного технічного університету,  
професор, доктор технічних наук

В. Б. Мокін

18 червня 2020 р.