

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
д.т.н., професору Михайлу АЛЕКСЄЄВУ

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА,
кандидата технічних наук, доцента Приходченка Сергія Дмитровича
на дисертаційну роботу
Стародубського Ігоря Петровича
«Методи та засоби переносимості програм та програмних систем на різні
обчислювальні платформи»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 «Інформаційні технології»
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

1. Загальна характеристика роботи

Повний обсяг роботи — 215 сторінок. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Список використаних джерел налічує 115 найменувань, робота містить 10 додатків, проілюстрована 17 рисунками та 9 таблицями.

До розгляду подано дисертацію на здобуття ступеня доктора філософії та копії усіх опублікованих автором робіт, які відображають результати та зміст дослідження.

2. Оцінка актуальності теми дисертації

Дисертаційна робота присвячена актуальній науково-прикладній задачі підвищення переносимості та рівня автоматизації програм і програмних систем на різні обчислювальні платформи в умовах динамічної зміни середовища функціонування. Тематика дослідження відповідає сучасним тенденціям розвитку комп'ютерних наук, зокрема напрямам adaptive computing, cloud-native систем, інтелектуального управління інфраструктурою та автоматизованої оптимізації програмного забезпечення.

Актуальність обраної теми зумовлена стрімким зростанням складності програмних систем, розширенням спектра обчислювальних платформ та поширенням гетерогенних обчислювальних середовищ. Класичні підходи до забезпечення переносимості — стандартизовані мови програмування й інтерфейси, крос-компіляція, віртуалізація та статична контейнеризація — мають переважно статичний характер і не враховують особливостей конкретної апаратно-програмної платформи, поточного стану системи та змінних умов

навантаження. Це зумовлює потребу у нових адаптивних методах, які поєднують контейнеризацію, автоматизоване управління ресурсами та інтелектуальні механізми адаптації на основі машинного навчання.

Для обґрунтування мети та поставлених у роботі задач автором проведено детальний аналіз сучасного стану проблеми переносимості програм та програмних систем, систематизовано критерії оцінювання й рівні абстракції, виконано порівняння стандартів, обчислювальних платформ і базових методів забезпечення переносимості (крос-компіляції, віртуалізації та контейнеризації). Розглянуто значну кількість сучасних наукових праць вітчизняних і зарубіжних авторів. Тема дисертаційного дослідження Стародубського І.П. є актуальною та важливою для розв'язання зазначених задач.

3. Оцінка наукових результатів дисертації

Вирішення поставлених завдань дисертаційної роботи виконано на основі нових наукових положень, які полягають у наступному:

- уперше розроблено метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту, який забезпечує автоматизоване та динамічне налаштування параметрів середовищ виконання програм відповідно до характеристик апаратно-програмної платформи, поточного стану системи та змінних умов навантаження і, на відміну від існуючих підходів, поєднує контейнерні технології з алгоритмами машинного навчання;
- уперше розроблено формалізовану модель переносимості програмних систем, у межах якої введено структуру стану системи $x(t) = (m(t), c(t), P)$ та кількісну функцію відхилення переносимості $D(t)$, що дає змогу оцінювати ступінь відхилення поведінки системи від еталонного або допустимого експлуатаційного профілю;
- уперше розроблено архітектуру інтелектуального управління контейнеризованими програмами у гетерогенних обчислювальних середовищах, що поєднує модулі аналізу середовища, системи моніторингу, алгоритми штучного інтелекту та засоби оркестрації контейнерів;
- уперше розроблено інформаційну технологію застосування машинного навчання для прогнозування потреб програм у ресурсах обчислювальної платформи на основі історичних даних і поточних метрик продуктивності, що дозволяє реалізувати проактивне управління середовищами виконання;
- удосконалено інформаційні технології забезпечення переносимості, автоматизації розгортання, масштабування та супроводу програмних систем у мультиплатформних і мультимарних середовищах за рахунок поєднання контейнерних технологій із методами машинного навчання та інтеграції інтелектуальних механізмів прийняття рішень в оркестрацію контейнерів;

- удосконалено метод управління контейнеризованими програмами у середовищах з обмеженими ресурсами (вбудовані та периферійні системи) із застосуванням адаптивних алгоритмів оптимізації;
- набули подальшого розвитку методи забезпечення переносимості у гетерогенних середовищах та інформаційні технології використання штучного інтелекту для підвищення продуктивності, стабільності й масштабованості програмних систем, що функціонують у динамічних умовах зі змінними вимогами до ресурсів.

Науковий інтерес становить запропонований механізм інтегрального (кількісного) оцінювання стану системи на основі функції відхилення переносимості $D(t)$. Робота містить елементи формалізації процесу адаптивного управління та демонструє прагнення автора перейти від евристичних методів до математично обґрунтованих механізмів прийняття рішень.

Заслуговує на позитивну оцінку запропонований автором перехід від розгляду переносимості як статичної характеристики програмного коду до її трактування як керованої динамічної властивості середовища виконання. Такий підхід дозволяє інтегрувати оцінювання переносимості безпосередньо у замкнений контур керування та використовувати кількісний індикатор $D(t)$ одночасно як цільову функцію керування і як критерій ефективності методу. Теоретичну цінність має також обґрунтування багаторівневої моделі забезпечення переносимості, у межах якої адаптація на етапі компіляції (build-time) та адаптація на етапі виконання (run-time) розглядаються не ізольовано, а як взаємодоповнювані механізми, що формують єдину систему підвищення переносимості програмного забезпечення у гетерогенних обчислювальних середовищах.

4. Оцінка практичного значення результатів роботи

Отримані автором результати мають виражену практичну спрямованість і можуть бути використані під час створення, розгортання та супроводу багатоплатформного програмного забезпечення в гетерогенних обчислювальних середовищах. Запропоновані рішення придатні для застосування у хмарних, мультихмарних, розподілених, периферійних та edge-інфраструктурах, а також у процесах DevOps та CI/CD. Програмний прототип методу реалізовано як керовану контейнеризовану систему, інтегровану з Kubernetes control plane та системою моніторингу Prometheus, що підтверджує прикладну цінність отриманих результатів і достатній рівень технічної опрацьованості запропонованого підходу.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напрямку кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» «Високопродуктивні багатопроцесорні системи: особливості конструювання, дослідження оцінок ефективності,

застосування до розв'язування прикладних задач» (Е-340, державний реєстраційний номер 0121U113718, 2025 р.).

Результати дисертаційної роботи впроваджено у діяльність ТОВ НВП «Агропромавтоматизація», іноземного підприємства «SoftRequest LTD», Державного науково-виробничого підприємства «Ельдорадо», ТОВ «Біологічні активні добавки», а також у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Результати впровадження підтверджені відповідними актами.

Окремо слід відзначити, що запропоновані рішення не потребують модифікації прикладного коду програмних систем і використовують стандартні механізми контейнерних платформ та систем оркестрації, зокрема Kubernetes. Це суттєво спрощує впровадження методу у наявні виробничі процеси розробки й експлуатації програмного забезпечення, знижує бар'єри інтеграції та забезпечує сумісність із поширеними cloud-native інструментами спостережуваності й автоматизації. Завдяки модульній побудові архітектури окремі компоненти методу можуть розгортатися як самостійні сервіси, що дозволяє адаптувати обчислювальні витрати на аналіз і прийняття рішень до масштабу та складності конкретної системи, а також застосовувати метод як у середовищах з обмеженими ресурсами, так і у великих розподілених інфраструктурах.

5. Оцінка достовірності та обґрунтованості основних положень і висновків дисертації

Наукові положення, висновки та пропозиції у достатній мірі обґрунтовані коректним застосуванням методів системного аналізу, математичного моделювання, теорії оптимізації, машинного навчання та контейнеризації, а також підтверджені результатами експериментів у гетерогенному контейнеризованому середовищі, їх зіставленням із базовими підходами керування та практичним застосуванням отриманих результатів.

Нові наукові результати та положення повністю відображені у 17 наукових працях: шість статей опубліковано у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України (усі індексуються у НМБД Index Copernicus), одна з них — категорії «А» та індексується у НМБД Web of Science; одинадцять наукових праць опубліковано у збірниках наукових праць та матеріалах міжнародних конференцій. Кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають особистий внесок автора і відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

6. Оцінка змісту й оформлення дисертації

Дисертаційна робота написана українською мовою. У роботі використано науковий стиль та загальноприйнятну термінологію. Робота виконана в чіткій

логічній послідовності відповідно до поставлених мети та задач досліджень. Постановка науково-прикладної задачі, вирішенню якої присвячена дисертаційна робота, є коректною.

У **першому розділі** здійснено системний аналіз теоретичних основ переносимості програм та програмних систем, розглянуто еволюцію поняття переносимості та її місце серед показників якості програмного забезпечення, систематизовано критерії оцінювання й рівні абстракції, виконано порівняльну характеристику стандартів, платформ і базових методів забезпечення переносимості. Обґрунтовано, що окремо взяті традиційні підходи не забезпечують достатнього рівня переносимості у динамічних гетерогенних середовищах.

У **другому розділі** розроблено та науково обґрунтовано метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту. Контейнеризовану програмну систему формалізовано як керований динамічний об'єкт із вектором стану $x(t) = (m(t), c(t), P)$; запроваджено кількісну функцію відхилення переносимості $D(t)$ і критерії її забезпечення, а задачу адаптації подано як мінімізацію прогнозованого відхилення на множині допустимих керуючих впливів. Запропоновано модульну архітектуру методу та замкнений керуючий цикл, у якому алгоритми машинного навчання виконують оцінювання поточного стану й прогнозування наслідків кандидатних дій.

У **третьому розділі** наведено практичну реалізацію та експериментальну перевірку методу. Розроблено програмний прототип, побудований за принципами controller-based architecture та інтегрований з Kubernetes control plane і системою моніторингу Prometheus. Сформовано гетерогенне експериментальне середовище, визначено профілі платформ і сценарії навантаження та проведено порівняння запропонованого методу з базовим режимом керування, що засвідчило зменшення середнього й максимального відхилення переносимості та скорочення частки часу порушення переносимості.

У **четвертому розділі** виконано порівняльний аналіз і обґрунтування комплексного застосування методів адаптації на рівнях компіляції та виконання. Розроблено метод адаптивної компіляції на основі генетичного алгоритму, задачу вибору параметрів трансляції коду формалізовано як багатокритеріальну дискретну оптимізацію. Експериментально на платформах ARM, Intel та GPU підтверджено приріст ефективності порівняно зі стандартними рівнями оптимізації та математично обґрунтовано синергетичний ефект поєднання адаптації на етапах build-time та run-time.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

Попри загалом позитивне враження від дисертаційної роботи, слід зазначити низку зауважень та дискусійних моментів.

- у роботі недостатньо формалізовано математичний апарат, який лежить в основі функції оцінювання відхилення переносимості $D(t)$: не повною мірою розкрито принципи нормалізації різнорідних параметрів та методику вибору вагових коефіцієнтів;
- недостатньо уваги приділено теоретичному аналізу стійкості адаптивного контуру керування — у роботі відсутні формальні докази збіжності або стабільності системи в умовах динамічної зміни параметрів середовища функціонування;
- потребує уточнення роль методів машинного навчання у запропонованій архітектурі: з тексту роботи не завжди однозначно зрозуміло, чи використовуються моделі машинного навчання як допоміжний евристичний механізм, чи як повноцінний елемент системи прийняття рішень;
- експериментальну частину роботи доцільно було б розширити шляхом порівняльного аналізу з існуючими аналогами;
- запропонований метод, орієнтований на мінімізацію відхилення переносимості $D(t)$, за певних сценаріїв може супроводжуватися підвищеним споживанням обчислювальних ресурсів, що в умовах хмарного розгортання здатне збільшувати вартість експлуатації; доцільно було б розглянути врахування вартісного (економічного) критерію поряд із критерієм переносимості;
- ефективність методу залежить від якості та повноти історичних даних, на яких навчаються моделі машинного навчання, тому за появи нових, нетипових сценаріїв навантаження точність оцінювання та прогнозування $D(t)$ може знижуватися.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

8. Висновок про дисертаційну роботу

Ознайомившись із науковими публікаціями та дисертацією І.П. Стародубського, а також зі звітом за результатами перевірки дисертаційної роботи на наявність текстових запозичень, відзначаю відсутність порушень академічної доброчесності.

Вважаю, що дисертація Стародубського Ігоря Петровича на тему «Методи та засоби переносимості програм та програмних систем на різні обчислювальні платформи», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», є завершеним науковим дослідженням, яке вирішує актуальну науково-прикладну задачу підвищення переносимості та рівня автоматизації програм і програмних систем на різні обчислювальні платформи.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, передбаченим наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) та «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. Здобувач Стародубський Ігор Петрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри програмного забезпечення
комп'ютерних систем
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»



Сергій ПРИХОДЧЕНКО