

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

ВІДГУК

офіційного опонента на кваліфікаційну наукову працю (дисертацію)
Стародубського Ігоря Петровича на тему «Методи та засоби переносимості програм та програмних систем на різні обчислювальні платформи», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

АКТУАЛЬНІСТЬ ОБРАНОЇ ТЕМИ

Дисертаційна робота Стародубського Ігоря Петровича спрямована на розв'язання науково-прикладної задачі підвищення переносимості та рівня автоматизації програм і програмних систем при їх перенесенні та експлуатації на різних обчислювальних платформах. Переносимість програмного забезпечення розглядається в роботі як здатність системи зберігати функціональну коректність та допустимі експлуатаційні характеристики при зміні обчислювальної платформи без модифікації прикладного коду.

Протягом останнього десятиліття індустрія розробки програмного забезпечення зазнала суттєвих змін, пов'язаних із переходом до хмарних і мультихмарних моделей розгортання, мікросервісних архітектур та контейнеризованих середовищ виконання. Одночасно стрімко зростає різноманіття апаратних платформ — від серверних процесорів і графічних прискорювачів до енергоощадних архітектур вбудованих і периферійних пристроїв. У цих умовах вартість супроводу багатоплатформного програмного

забезпечення та трудомісткість ручного налаштування середовищ виконання істотно зростають, а традиційні засоби забезпечення переносимості перестають задовольняти вимоги практики.

Наявні підходи — стандартизовані мови програмування та інтерфейси, крос-компіляція, віртуалізація і статична контейнеризація — забезпечують лише часткове розв'язання задачі, оскільки спираються на заздалегідь визначені конфігурації та не пристосовані до динамічної зміни навантаження, ресурсних обмежень і різноманітності цільових платформ. Як наслідок, у сучасних гетерогенних інфраструктурах виникає потреба у засобах, які здатні автоматично враховувати характеристики платформи та поточний стан системи й самостійно коригувати параметри середовища виконання.

З огляду на викладене, розробка методів і засобів забезпечення переносимості, що поєднують контейнеризацію, автоматизоване управління ресурсами та інтелектуальні механізми адаптації на основі машинного навчання, є своєчасним і практично значущим завданням сучасної програмної інженерії та комп'ютерних наук. Його розв'язання дозволяє зменшити залежність розробників від ручного конфігурування, прискорити виведення програмних продуктів в експлуатацію та підвищити стабільність, продуктивність і масштабованість багатоплатформних систем. Це й визначає актуальність обраної теми дисертаційного дослідження.

АНАЛІЗ ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 215 сторінок; список використаних джерел налічує 115 найменувань, робота містить 10 додатків, проілюстрована 17 рисунками та включає 9 таблиць. Структура роботи побудована логічно — від аналізу проблеми до формалізації, програмної реалізації та експериментальної перевірки запропонованих рішень.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми, формулювання мети та завдань, визначення об'єкта, предмета і методів дослідження, виклад наукової новизни та практичного значення, відомості про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації за темою дисертації.

Перший розділ присвячено аналізу теоретичних засад переносимості програм і програмних систем. Автор розглядає поняття переносимості та її місце серед характеристик якості програмного забезпечення, систематизує критерії оцінювання й рівні абстракції, а також виконує порівняння стандартів, платформ і базових методів (крос-компіляції, віртуалізації, контейнеризації). За результатами аналізу зроблено обґрунтований висновок про те, що окремо взяті традиційні підходи не забезпечують достатнього рівня переносимості у динамічних гетерогенних середовищах і потребують поєднання з адаптивними механізмами керування.

У другому розділі викладено основний теоретичний результат роботи — метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту. Контейнеризовану програмну систему формалізовано як керований динамічний об'єкт із вектором-функцією стану $x(t)$ та рівнянням переходу стану; 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. Заслуговує на увагу те, що метод інтегрується з контейнерною інфраструктурою без втручання у прикладний код.

Третій розділ описує практичну реалізацію та експериментальну перевірку методу. Здобувачем розроблено програмний прототип, побудований за принципами *controller-based architecture* та інтегрований з *Kubernetes control plane* і системою моніторингу *Prometheus*, у якому кожен елемент

формалізованої моделі відображено у відповідному програмному компоненті. Сформовано гетерогенне експериментальне середовище, визначено профілі платформ і сценарії навантаження та проведено порівняння запропонованого методу з базовим режимом керування. Отримані результати, представлені у вигляді таблиць та аналізу динаміки $D(t)$, засвідчують зменшення середнього й максимального відхилення переносимості та скорочення частки часу, протягом якого порушується умова переносимості.

Четвертий розділ містить 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, а її розв'язання реалізовано засобами еволюційного пошуку. Експериментально на платформах ARM, Intel та GPU підтверджено приріст ефективності порівняно зі стандартними рівнями оптимізації, а математично обґрунтовано синергетичний ефект поєднання адаптації на етапах build-time та run-time.

У додатках наведено список опублікованих праць здобувача, документи про впровадження результатів та лістинги програмної реалізації основних компонентів керуючого циклу.

СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

Наукові положення дисертації спираються на коректне використання методів системного аналізу, теорії алгоритмів, принципів програмної інженерії, технологій віртуалізації та контейнеризації, алгоритмів машинного навчання, методів математичного моделювання, аналізу часових рядів і теорії оптимізації, а також методів експериментального оцінювання продуктивності програмних систем.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечуються несуперечливістю теоретичних побудов, відповідністю між формалізованою моделлю та її програмною реалізацією, а також узгодженістю розрахункових і експериментальних даних. Висновки роботи підтверджено результатами експериментів у гетерогенному контейнеризованому середовищі з прямим зіставленням базового та запропонованого режимів керування за єдиними кількісними критеріями, апробацією на міжнародних наукових конференціях та актами впровадження результатів у практичну діяльність підприємств і в навчальний процес. Основні результати повно висвітлено у публікаціях здобувача, зокрема у виданні, що індексується наукометричною базою Web of Science.

ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ

Дослідження виконано в межах 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.). Тема дисертації безпосередньо пов'язана з розробкою методів, моделей і технологій створення багатоплатформних програмних систем та автоматизації управління програмним забезпеченням у складних комп'ютерних системах.

НАУКОВА ЦІННІСТЬ ДИСЕРТАЦІЇ, ПРИКЛАДНА ЦІННІСТЬ ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

У дисертаційному дослідженні розв'язано важливу науково-прикладну задачу підвищення переносимості та автоматизації програм і програмних систем на різні обчислювальні платформи на основі методу адаптивної контейнеризації

з інтеграцією штучного інтелекту. Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому.

Уперше:

- запропоновано метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту, який, на відміну від відомих рішень, об'єднує контейнерні технології з алгоритмами машинного навчання та забезпечує динамічне налаштування параметрів середовищ виконання залежно від характеристик апаратно-програмної платформи, поточного стану системи й умов навантаження;
- побудовано формалізовану модель переносимості із вектором-функцією стану $x(t)$ та кількісним показником відхилення переносимості $D(t)$, що дає змогу вимірювати ступінь відхилення поведінки системи від еталонного чи допустимого експлуатаційного профілю;
- запропоновано архітектуру інтелектуального управління контейнеризованими програмами у гетерогенних середовищах, що поєднує модулі аналізу середовища, моніторингу, алгоритми штучного інтелекту та засоби оркестрації;
- розроблено інформаційну технологію застосування машинного навчання для прогнозування потреб програм у обчислювальних ресурсах на основі історичних даних і поточних метрик, що уможливорює проактивне управління середовищами виконання.

Удосконалено:

- інформаційну технологію забезпечення переносимості за рахунок поєднання контейнерних технологій із машинним навчанням, що дозволяє перейти від статичних до адаптивних конфігурацій середовищ виконання;
- інформаційну технологію автоматизації розгортання, масштабування та супроводу програмних систем у мультиплатформних і мультихмарних

середовищах завдяки інтеграції інтелектуальних механізмів прийняття рішень в оркестрацію контейнерів;

- метод управління контейнеризованими програмами у середовищах з обмеженими ресурсами, зокрема у вбудованих та периферійних системах, із застосуванням адаптивних алгоритмів оптимізації.

Набули подальшого розвитку:

- методи забезпечення переносимості у гетерогенних середовищах за рахунок інтелектуальних механізмів аналізу та адаптації середовищ виконання;
- інформаційні технології використання штучного інтелекту для підвищення продуктивності, стабільності та масштабованості систем, що працюють у динамічних умовах зі змінними вимогами до ресурсів;
- методи автоматизованого управління середовищами виконання у мультимарних інфраструктурах, що зменшують залежність від конкретного постачальника хмарних послуг і підвищують гнучкість розгортання.

Практична цінність роботи визначається можливістю безпосереднього застосування розроблених методів і програмного прототипу при проектуванні, розгортанні та супроводі багатоплатформного програмного забезпечення. Запропонований метод інтегрується зі стандартними системами оркестрації контейнерів, не потребує модифікації прикладного коду і може використовуватися у хмарних, мультимарних, периферійних та вбудованих середовищах, а також у процесах DevOps і CI/CD. Практичне значення підтверджується актами впровадження результатів у діяльність ТОВ НВП «Агропромавтоматизація», іноземного підприємства «SoftRequest LTD», Державного науково-виробничого підприємства «Ельдорадо», ТОВ «Біологічні

активні добавки» та у навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Отримані результати становлять корисний внесок у розвиток методів і засобів забезпечення переносимості програмного забезпечення та можуть бути рекомендовані для застосування при побудові надійних, масштабованих і переносимих програмних систем у різних галузях, де програмні продукти експлуатуються одночасно на різномірних обчислювальних платформах.

ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ

За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць. Із них шість статей розміщено у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України (усі індексуються у НМБД Index Copernicus), причому одна стаття належить до категорії «А» та індексується у НМБД Web of Science; одинадцять праць опубліковано у збірниках наукових праць і матеріалах міжнародних конференцій. Кількість, рівень і тематична спрямованість публікацій відповідають вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а опубліковані результати достатньою мірою розкривають основні положення та висновки роботи.

ЗАУВАЖЕННЯ ПО РОБОТІ

1. Вибір оптимального керуючого впливу $u^*(t)$ на кожному кроці реалізовано жадібним (greedy) алгоритмом у дискретному просторі допустимих дій із застосуванням механізмів гістерезису та cooldown. Для повноти викладу корисним було б додаткове зіставлення такої стратегії з альтернативними підходами до вибору керуючої дії на просторі $U(x,P)$ на окремих тестових сценаріях.

2. Програмний прототип контролера є централізованим компонентом керуючого циклу; питання його високої доступності та відмовостійкості (поведінка системи у разі відмови контролера, реплікація, тестування) у роботі розглянуто оглядово. Детальніше опрацювання цих аспектів є доцільним при доведенні прототипу до промислового рівня.
3. Часові параметри керуючого циклу — період ітерації Δ та ширина вікна спостереження W — описано якісно як компроміс між швидкістю реакції та стійкістю. Було б доцільним навести значення, використані в експериментах.
4. У роботі наведено результати щодо зниження енергоспоживання на платформі ARM, отримані за показаннями вбудованих апаратних сенсорів. Для повноти викладу доцільно було б детальніше описати у тексті процедуру вимірювання та кількість повторних запусків, за якими отримано усереднені оцінки.
5. У роботі бракує кількісної оцінки накладних витрат, які вносить сам механізм адаптації (робота контролера, збір телеметрії засобами Prometheus) у споживання ресурсів керованої системи, що дозволило б оцінити співвідношення «вартість–ефект» запропонованого підходу.
6. У тексті місцями спостерігається непослідовність у використанні україномовної та англійської термінології (частина термінів подається паралельно в обох формах) та трапляються поодинокі неточні формулювання, що мають редакційний характер і потребують уточнення.

Зазначені зауваження не є принциповими, стосуються переважно деталізації та повноти викладу й не знижують наукової та практичної цінності виконаного дослідження.

ВИСНОВОК ПО РОБОТІ

Дисертаційна робота Стародубського Ігоря Петровича «Методи та засоби переносимості програм та програмних систем на різні обчислювальні платформи» є самостійним і завершеним науковим дослідженням, у якому розв'язано важливу науково-прикладну задачу підвищення переносимості та автоматизації програм і програмних систем на різні обчислювальні платформи. Робота характеризується чіткою постановкою задачі, обґрунтованістю теоретичних положень та доведеною практичною реалізованістю запропонованих рішень.

Цінним є те, що автор не обмежився адаптацією на рівні середовища виконання, а сформував цілісну, багаторівневу систему забезпечення переносимості, у якій адаптивна компіляція та адаптивна контейнеризація доповнюють одна одну. Такий підхід демонструє інженерну зрілість виконавця, здатність доводити наукові ідеї до програмної реалізації та інтегрувати їх з реальними інструментами оркестрації контейнерів, що широко застосовуються у промисловій розробці програмного забезпечення.

Висловлені зауваження мають уточнювальний і рекомендаційний характер, не зачіпають основних наукових результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. За актуальністю, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю та практичною значущістю одержаних результатів дисертація відповідає вимогам, що висуваються до кваліфікаційних наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії. Викладення матеріалу логічне та послідовне, оформлення відповідає чинним вимогам, а опубліковані праці повно відображають зміст дослідження.

Вважаю, що дисертаційна робота відповідає змісту та компетентностям освітньо-наукової програми доктора філософії, за якою навчався здобувач, вимогам «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, а її автор — Стародубський Ігор Петрович — заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп’ютерні науки».

Офіційний опонент:

професор кафедри інженерії програмного забезпечення
Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу,
доктор технічних наук, професор



Василь ШЕКЕТА