

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Форкерта Павла Павловича на тему **«Дослідження використання рантайму Go як платформи для побудови нових мов програмування»**, представлену на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення

Актуальність теми дисертаційної роботи. Створення нових мов програмування є однією з фундаментальних задач сучасної інженерії програмного забезпечення. Кожна значуща предметна область формує власні вимоги до виразності коду, безпечності, зручності абстрагування та продуктивності виконання, тому поряд із загальновживаними мовами постійно з'являються нові мови, діалекти, надмножини та предметно-орієнтовані мови. Водночас класичний підхід до створення мови, що передбачає повний цикл робіт від формалізації граматики до реалізації власного рантайму та збирача сміття, є надзвичайно дорогим. Саме тому значна частина сучасних мов будується на базі вже наявних платформ, таких як JVM, LLVM або GraalVM/Truffle.

Дисертаційна робота Форкерта П. П. присвячена дослідженню порівняно малодослідженого напрямку — використання рантайму мови Go як платформи для побудови нових мов програмування шляхом транспіляції у звичайний Go-код. Незважаючи на поширеність Go у хмарній, серверній та інфраструктурній розробці, її потенціал як хост-платформи для гостей мов системно не аналізувався. Актуальність дослідження не викликає сумнівів, адже воно заповнює наявну прогалину між добре дослідженими платформами (JVM, LLVM) та практичною потребою в дешевших методах створення нових мов і мовних розширень.

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до індивідуального плану

підготовки здобувача ступеня доктора філософії кафедри інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження здійснювалося в рамках науково-дослідних робіт № ФПМ-2-22 «Розроблення програмного забезпечення аналізу та кластеризації часових рядів» (2022–2024 рр., № держреєстрації 0122U001465), № 58-ФПМ-2-25 «Розроблення інформаційної технології обробки статистичних даних» (2025–2027 рр., № держреєстрації 0125U002280).

Формулювання наукової задачі, розв'язання якої одержане в дисертації. Дисертаційна робота Форкєрта П. П. спрямована на розв'язання актуальної науково-технічної задачі — обґрунтування зручності та доцільності використання рантайму Go як платформи для побудови нових мов програмування, а також розроблення й експериментальна перевірка архітектурних, алгоритмічних і програмних засобів, що забезпечують реалізацію таких мов через транспіляцію у Go.

Конкретні завдання дослідження:

1. провести аналіз сучасних підходів до реалізації мов програмування, включно з компіляцією в машинний код, використанням віртуальних машин, проміжних представлень і транспіляції;
2. дослідити інженерні властивості Go як потенційної хост-платформи та визначити критерії оцінювання її придатності для реалізації нових мов;
3. розробити загальну архітектуру транспілятора, що перетворює код гостьової мови в код на Go зі збереженням семантики та максимальною сумісністю з екосистемою Go;
4. створити експериментальний діалект GoNext як доказ можливості додавання нових мовних конструкцій без модифікації офіційного компілятора Go;

5. реалізувати та проаналізувати механізми транспіляції для повнофункціональних enum-типів, зіставлення із взірцем, іменованих аргументів, значень параметрів за замовчуванням, методів розширення, узагальнених методів, коротких анонімних функцій та універсального синтаксису виклику функцій;

6. оцінити зручність, виразність, інтероперабельність і накладні витрати запропонованого підходу та узагальнити результати на ширший клас задач.

Наукова новизна отриманих результатів. Вважаю, що наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше системно обґрунтовано доцільність розгляду рантайму Go як хост-платформи особливого типу для побудови нових мов програмування — не як багатомовної віртуальної машини і не як низькорівневого компіляторного фреймворку, а як цілі транспіляції для мов із високою інтероперабельністю з екосистемою Go.

2. Удосконалено підхід до оцінювання придатності Go як цілі транспіляції за рахунок комплексного врахування виконувальних властивостей, виразних можливостей хост-мови, інтероперабельності, інструментальної підтримки транспіляції та вартості реалізації мовних конструкцій.

3. Удосконалено архітектурний підхід до побудови мовних розширень у формі надмножини Go з поетапною трансформацією у звичайний Go-код, який поєднує нормалізацію конструкцій, частковий семантичний аналіз і перетворення у вузли go/ast, що дає змогу коректно реалізовувати конструкції, залежні від сигнатур функцій, областей видимості, контекстного відновлення типів і правил уніфікації типів Go, із збереженням двосторонньої інтероперабельності з екосистемою Go.

4. Вперше в межах єдиного транспіляційного підходу показано можливість реалізації комплексу мовних розширень поверх Go-рантайму

без модифікації офіційного компілятора Go, зокрема повнофункціональних enum-типів, зіставлення із взірцем, іменованих аргументів, параметрів за замовчуванням, методів розширення, узагальнених методів, коротких анонімних функцій та універсального синтаксису виклику функцій.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність дослідження виявляється в таких аспектах:

1. Запропоновані підходи дають змогу істотно зменшити вартість створення нової мови програмування або її діалекту завдяки повторному використанню компілятора, рантайму, системи збірки та бібліотек Go. Кожна програма, отримана через транспіляцію в Go, автоматично набуває властивостей звичайних Go-застосунків: статичної збірки, кроскомпіляції, доступу до стандартної бібліотеки та звичних механізмів розгортання.
2. Створено експериментальний діалект GoNext і транспілятор, які втілюють запропоновану архітектуру та демонструють практичну реалізованість комплексу мовних розширень зі збереженням двосторонньої інтероперабельності зі звичайним Go-кодом, що дозволяє поступово впроваджувати нову мову в наявні проекти.
3. Запропоновано класифікацію перетворень мовних розширень на синтаксичні, структурні та репрезентаційні, яка дозволяє заздалегідь передбачати складність реалізації та характер накладних витрат нових мовних конструкцій.
4. Сформульовано практичну методику прийняття рішення про вибір Go як цільової платформи, що перетворює загальну тезу про придатність Go на конкретну схему інженерного прийняття рішень.
5. Результати роботи можуть бути використані під час створення нових DSL для конфігурації та оркестрації систем, серверних мов програмування, експериментальних надмножин Go, навчальних

компіляторів, а також у дослідницьких проєктах, що вивчають межі еволюційного розширення існуючих мов програмування.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на ретельному аналізі сучасних підходів до реалізації мов програмування, зокрема робіт про LLVM, JVM, Truffle та транспіляцію, а також на методах теорії мов програмування, побудови компіляторів та інженерії програмного забезпечення. Обґрунтованість результатів підтверджується експериментальною реалізацією діалекту GoNext, у межах якого перевірено запропоновану архітектуру транспілятора та класифікацію трансформацій на репрезентативному наборі мовних розширень різної складності.

Достовірність висновків забезпечується узгодженістю теоретичної моделі оцінювання, сформульованої у другому розділі, з експериментальними результатами третього розділу, а також порівняльним аналізом Go з альтернативними платформами (JVM, LLVM, JavaScript-екосистемою). Особливої уваги заслуговує аналіз меж застосовності підходу, зокрема, дослідження впливу збирача сміття та узагальнень на схеми представлення enum-типів і обмеження контекстного виведення типів для коротких анонімних функцій, що свідчить про критичне та збалансоване ставлення автора до власних результатів.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто та за його безпосередньою участю. Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, виконаним автором відповідно до його індивідуального навчального плану. Зокрема, дисертантом проведено пошук та аналіз літературних джерел; сформульовано критерії оцінювання хост-платформ; спроектовано архітектуру транспілятора; розроблено концепцію та

реалізацію діалекту GoNext; виконано постановку та аналіз експериментів і узагальнення результатів.

Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення.

Дисертаційна робота має класичну структуру, яка включає:

1. **Вступ**, де обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та завдання дослідження, описано об'єкт і предмет дослідження, а також наукову новизну та практичне значення роботи;

2. **Розділ 1**, що містить аналіз сучасного стану досліджень у галузі реалізації мов програмування на базі наявних платформ. Розглянуто підходи на основі JVM, LLVM і Truffle/GraalVM, транспіляцію як механізм побудови мов поверх існуючих екосистем, інженерні властивості Go як потенційної хост-платформи, дотичні наукові та практичні проекти (Grumpy, Oden, Borgo, Tengo), а також інструментальну екосистему Go для побудови транспіляторів;

3. **Розділ 2**, що присвячений теоретичним засадам використання Go як платформи для нових мов. Запропоновано п'ятикомпонентну модель критеріїв оцінювання хост-платформи, визначено класи мов, для яких Go є доцільною ціллю транспіляції, розроблено узагальнену архітектуру транспілятора, класифікацію трансформацій мовних розширень на синтаксичні, структурні та репрезентаційні, а також сформульовано принципи проектування нових мов на базі Go;

4. **Розділ 3**, який містить опис експериментальної реалізації підходу у вигляді діалекту GoNext. Детально розглянуто реалізацію повнофункціональних enum-типів, конструкції match, значень параметрів за замовчуванням, іменованих аргументів, методів розширення, узагальнених методів, короткого синтаксису анонімних функцій та універсального синтаксису виклику функцій, проаналізовано взаємодію розширень між собою та інтероперабельність GoNext зі звичайним Go;

5. **Розділ 4**, присвячений комплексному оцінюванню доцільності підходу за сформульованими критеріями, порівнянню Go з альтернативними платформами, аналізу обмежень і ризиків, а також методиці прийняття рішення про вибір Go як цільової платформи та перспективним напрямом подальших досліджень;

6. **Висновки** складаються з 10 пунктів. Вони логічно та послідовно сформульовані, повністю відображають отримані здобувачем результати. Чітка та логічна побудова розділу дозволяє характеризувати здобувача як сформованого науковця, здатного самостійно вирішувати поставлені завдання;

7. **Список використаних джерел** містить 92 найменування;

8. **Додатки**, які містять список публікацій здобувача за темою дисертації та код транспілятора GoNext.

Загальний обсяг дисертації становить 204 сторінки, обсяг основного тексту — 116 сторінок. Робота написана українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Матеріал викладено логічно, послідовно та чітко.

Зауваження по роботі

Незважаючи на високий науковий рівень роботи, є декілька зауважень, які не впливають на загальну позитивну оцінку, але можуть бути враховані для подальшого вдосконалення:

1. У першому розділі огляд практичних проєктів, що використовують Go як платформу для інших мов (Grumpy, Oden, Borgo, Tengo), доцільно було б систематизувати у вигляді порівняльної таблиці за сформульованими у роботі критеріями. Це зробило б обґрунтування дослідницької ніші ще більш наочним.

2. Запропонована у другому розділі п'ятикомпонентна модель оцінювання хост-платформи має переважно якісний характер. Бажано було б запропонувати шкали або вагові коефіцієнти для окремих критеріїв,

що надало б методиці прийняття рішення з підрозділу 4.12 більшої формальності та відтворюваності.

3. У розділах 2 і 4 одним із ключових критеріїв доцільності підходу виступає низька вартість реалізації нової мови, проте ця теза підтверджується переважно якісними міркуваннями. Доцільно було б навести кількісні характеристики експериментального транспілятора GoNext, зокрема обсяг власного коду та співвідношення власного і повторно використаного коду екосистеми Go, що зробило б аргумент про економіку реалізації наочнішим.

4. У підрозділі 3.13 проблему відображення позицій між вихідним кодом GoNext і згенерованим Go-кодом лише окреслено як напрям майбутнього розвитку. Бажано було б навести хоча б ескіз можливого рішення на основі механізму source maps, оскільки якість діагностики помилок безпосередньо впливає на практичну придатність транспілятора.

5. У тексті роботи зустрічаються незначні стилістичні неточності.

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Форкерта Павла Павловича «Дослідження використання рантайму Go як платформи для побудови нових мов програмування», представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення, відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій, які встановлені відповідно наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «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 січня 2022 р., зі змінами), а її автор Форкерт Павло Павлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент

доцент кафедри інформатики та програмної інженерії факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кандидат технічних наук

**Андрій
ГУБСЬКИЙ**

Підпис Губського А. М. засвідчую.
Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського

Т.В.О



**Валерія
ХОЛЯВКО**
Галина Воляко