

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента, професора кафедри мережевих та інтернет технологій

Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Плюща Олександра Григоровича

на дисертаційну роботу Гамрецького Романа Михайловича

на тему «Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

### **Актуальність теми дисертації**

Сучасні інформаційно-комунікаційні системи (ІКС) дедалі більшою мірою залежать від програмних компонентів, що реалізують мережеві функції, сервісну взаємодію, керування ресурсами, механізми безпеки та процедури масштабування. За таких умов якість програмного забезпечення (ПЗ) проявляється не лише через властивості програмного продукту, зафіксовані на етапах розроблення і тестування, а й через його поведінку під час фактичного функціонування під навантаженням та за зміни мережевого середовища.

Дисертаційна робота Гамрецького Романа Михайловича спрямована на розв'язання саме цієї суперечності між формальною оцінкою продуктових характеристик і необхідністю враховувати експлуатаційну динаміку ІКС. Автор обґрунтовує доцільність поєднання статичних характеристик ПЗ із динамічними операційними показниками та на цій основі формує комплексну модель інтегрального оцінювання. Окремий напрям дослідження – доменно-орієнтований метод для ПЗ ядра 5G, де якість залежить від узгодженої роботи мережевих функцій, сигналізаційних процедур, площини користувача та інфраструктурного стану.

Актуальність теми підтверджується також вибраними експериментальними об'єктами. Перевірка доменного методу виконана на стенді free5GC з емуляцією користувацького навантаження UERANSIM у

сценаріях 100, 300 та 500 UE, а комплексну модель перевірено в середовищі Proxmox VE із використанням NetEm для контрольованої деградації мережеских умов на прикладі трьох компонентів (Auth, IoT та SDN). Таким чином, робота орієнтована на проблематику, характерну для програмно-керованих, віртуалізованих і сервісно-орієнтованих телекомунікаційних систем.

Отже, тема дисертації є актуальною, відповідає сучасному напрямку розвитку телекомунікаційних та ІКС і має як наукове, так і прикладне значення.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

У роботі отримано взаємопов'язані наукові результати, які розвивають метричні підходи до оцінювання якості ПЗ в ІКС.

1. Вперше запропоновано доменно-орієнтований метод комплексної оцінки якості ПЗ ядра 5G-мереж, у якому базові характеристики, сформовані з опорою на ISO/IEC 25010, поєднуються з доменно-специфічними показниками телекомунікаційного ядра, зокрема показниками сигналізаційних процедур, масштабованості та енергоефективності на сесію. Метод передбачає оцінювання на сервісному, функціональному та інфраструктурному рівнях.

2. Удосконалено спосіб розрахунку інтегрального показника якості завдяки алгоритму адаптивного коригування вагових коефіцієнтів, що змінює відносний внесок динамічної складової за наявності ознак деградації або критичних змін навантаження.

3. Вперше розроблено комплексну багаторівневу модель інтегральної оцінки якості ПЗ ІКС, у якій статичні властивості програмного продукту поєднано з динамічними операційними метриками, що дозволяє зіставляти формально задекларовані властивості з фактичною поведінкою системи під навантаженням.

4. Дістали подальшого розвитку критеріальні моделі оцінювання якості ПЗ сучасних ІКС через формалізацію включення доменно-релевантних показників кібербезпеки, енергоспоживання та стійкості мікросервісів до референтних моделей якості.

Наукові положення підкріплені формалізацією процедур нормалізації, зважування й агрегування різнорідних метрик. Важливо, що в роботі автор не обмежився отриманням одного інтегрального числа: для 5G Core підсумкова оцінка декомпонується за рівнями, що дає змогу інтерпретувати джерело деградації.

У навантажувальній серії доменно-орієнтований показник зменшувався від 0,967 для 100 UE до 0,875 для 300 UE та 0,760 для 500 UE. При цьому аналіз показав, що погіршення пов'язане переважно із сервісно-процедурною складовою, тоді як контрольні показники площини користувача залишалися в установлених межах.

### **Мова та стиль викладення дисертації**

Дисертаційну роботу викладено українською мовою у науковому стилі. Термінологічний апарат загалом послідовний і відповідає предметній області програмної інженерії, телекомунікацій та експлуатаційного моніторингу. Використані скорочення наведено у відповідному переліку, а основні поняття розкриваються в контексті стандартів SQuaRE, ISO/IEC 25010, мереж 5G, SDN/NFV та сучасних ІКС.

Формули, таблиці, рисунки та схеми виконують змістову функцію і пов'язані з логікою дослідження. Матеріал подано від аналізу існуючих підходів до формування метричної основи, розроблення моделі та методу і подальшої експериментальної перевірки. Така послідовність сприяє цілісному сприйняттю отриманих результатів. Посилання на використані джерела наведено в тексті, а публікації здобувача за темою дисертації винесено в окремий перелік.

## **Загальна структура та зміст дисертаційної роботи**

Структура дисертації відповідає логіці проведеного дослідження та забезпечує послідовне розкриття поставлених завдань. Матеріал розділів взаємопов'язаний, а наведені таблиці, рисунки й додатки доповнюють виклад теоретичних положень та результатів експериментальної перевірки.

У вступі визначено мету дослідження, вісім завдань, об'єкт і предмет, методи, наукову новизну та практичне значення. Метою є підвищення точності, об'єктивності та практичної придатності оцінювання якості ПЗ в ІКС шляхом розроблення комплексної моделі та доменно-орієнтованого методу, які враховують взаємозв'язок між статичними характеристиками програмного продукту та його динамічними операційними показниками в умовах змінного навантаження.

Перший розділ формує теоретико-методичну основу дослідження: проаналізовано стандарти SQuaRE, ISO/IEC 25010, процесні, атрибутивні, цільово-метричні та багатокритеріальні підходи, а також визначено їхні обмеження щодо врахування експлуатаційної динаміки ІКС.

Другий розділ присвячено системі статичних і динамічних метрик, їх взаємозв'язку, нормалізації, зважуванню та інтерпретації. Статичний блок охоплює, зокрема, функціональну повноту, контроль доступу, модульність, складність і адаптивність; динамічний – затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, доступність, відновлюваність та масштабованість.

У третьому розділі розроблено комплексну модель оцінювання якості ПЗ в ІКС і доменно-орієнтований метод для ПЗ ядра 5G. Метод формалізує послідовність формування контексту, збирання показників, нормалізації, зважування й агрегації, адаптивної корекції та інтерпретації результатів.

У четвертому розділі проведено дві експериментальні серії: для free5GC + UERANSIM і для Proxmox VE + NetEm. Для комплексної моделі показано різні траєкторії деградації компонентів при переході від 10 % до 50 % і 100 % профілю мережевої деградації.

У дисертації також окремо сформульовано обмеження дослідження: лабораторний характер стендів, обмежений базовий набір метрик, залежність вагових профілів від предметної області, необхідність зовнішньої валідації методу 5G Core на інших реалізаціях, а також інструментальна залежність процедур збору даних. Наявність такого розділу позитивно характеризує коректність інтерпретації експериментальних результатів.

Основні результати дисертаційного дослідження належним чином представлені у наукових публікаціях здобувача, серед яких є статті у виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, а також праці, проіндексовані в наукометричній базі Scopus. Зміст опублікованих матеріалів узгоджується з тематикою дисертації та відображає її основні наукові положення й одержані результати. Результати дослідження також були апробовані на профільних наукових і науково-технічних конференціях, що свідчить про належний рівень їх представлення та обговорення у фаховому середовищі.

За результатами ознайомлення з дисертаційною роботою та науковими публікаціями здобувача ознак академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації не виявлено.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практичне значення роботи полягає у можливості застосовувати розроблені модель і метод під час розроблення, тестування та експлуатації ПЗ ІКС для порівняння альтернативних реалізацій і конфігурацій, контролю якості за змінного навантаження, виявлення деградації та підтримки рішень щодо масштабування й оптимізації.

Для телекомунікаційної практики важливим є те, що доменно-орієнтований метод для 5G Core не зводить оцінювання до перевірки однієї функціональної ознаки. У дослідженні одночасно враховано успішність реєстрації та встановлення PDU-сесій, події T3580, часові характеристики сигналізаційних процедур, показники RTT, джитера, втрат пакетів,

пропускної здатності та інфраструктурної стійкості. Окреме зіставлення фактичних показників площини користувача з контрольними межами дозволяє відрізнити деградацію процедур площини керування від порушення допустимих параметрів передавання даних.

Комплексна модель може бути інтегрована із засобами моніторингу та використана для побудови динамічних профілів якості. Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем і в практичну діяльність ТОВ «СМАРТ ПАВЕР», що підтверджено відповідними актами впровадження.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу, вважаю за доцільне висловити такі зауваження та дискусійні положення:

1. Вагові коефіцієнти відіграють принципову роль як у комплексній моделі, так і в доменно-орієнтованому методі. У роботі обґрунтовано їх залежність від критичності сценарію та передбачено адаптивне коригування, однак окремий кількісний аналіз чутливості підсумкових індексів до варіації базових ваг зробив би межі стійкості отриманих оцінок ще більш наочними.

2. Нормалізація метрик виконується відносно мінімальних і максимальних меж, визначених вимірюваннями, еталонними значеннями або експлуатаційним профілем. Для практичного розгортання методу доцільно формально зафіксувати правило оброблення значень, що виходять за попередньо встановлений діапазон, аби однаково трактувати екстремальні режими в різних інсталяціях.

3. У моделі одночасно агрегуються кілька динамічних показників, які можуть бути статистично взаємопов'язаними. Окремий аналіз кореляцій або надлишковості метрик дозволив би додатково обґрунтувати відсутність подвійного врахування одного й того самого прояву мережевої деградації в інтегральному показнику.

4. Зовнішня валідність доменно-орієнтованого методу підтверджена в межах стеку free5GC та контрольованого стенда UERANSIM. Автор коректно зазначає це як обмеження; подальша перевірка на альтернативній реалізації 5G Core дала б змогу відокремити універсальні властивості методу від особливостей конкретного програмного стеку.

5. Експериментальна серія для Auth-сервісу, IoT-компонента та SDN-контролера демонструє чутливість моделі до контрольованої мережевої деградації, однак не є повномасштабною імітацією промислового багатокористувацького навантаження. Розширення перевірки на довготривалі сценарії з конкуренцією за ресурси та комбінованими відмовами підсилило б практичну доказовість моделі.

Наведені зауваження мають рекомендаційний і дискусійний характер, узгоджуються з межами проведеної валідації, окресленими самим автором, та не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Дисертаційна робота Гамрецького Романа Михайловича на тему «Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-практичне завдання розвитку методів і моделей кількісного оцінювання якості ПЗ в ІКС шляхом інтеграції статичних характеристик програмного продукту з динамічними операційними показниками та доменною адаптації метричного апарату для ПЗ ядра 5G. Побудова дослідження, обґрунтований вибір методів, формалізація метричного апарату та організація експериментальної перевірки свідчать про належне оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.

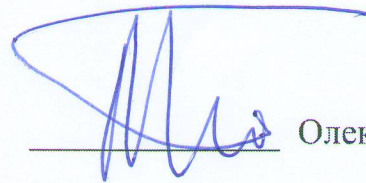
Наукові результати дисертації мають новизну, належний рівень обґрунтованості та експериментального підтвердження в межах визначених сценаріїв. За актуальністю, науковим рівнем, змістом, обґрунтованістю результатів, ступенем розв'язання поставленого наукового завдання, рівнем

оприлюднення результатів і практичним значенням дисертаційна робота відповідає 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 року № 44 (зі змінами).

Вважаю, що Гамрецький Роман Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

**ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ**

професор кафедри мережеских та  
інтернет технологій  
КНУ імені Тараса Шевченка,  
д.т.н., доцент



Олександр ПЛЮЩ

*Заступник ректора*

