Голові разової спеціалізованої вченої ради
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
доктору технічних наук,
професору кафедри математичної інформатики
факультету комп'ютерних наук та кібернетики
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Заславському Володимиру Анатолійовичу

**ВІДГУК**

на дисертаційну роботу
Чепеля Леоніда Валерійовича
«МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОЇ БЛОКЧЕЙН-АРХІТЕКТУРИ З АДАПТИВНИМ КОНСЕНСУСОМ ТА МУЛЬТИФАКТОРНИМ УПРАВЛІННЯМ ВУЗЛАМИ»
подану на здобуття ступеня доктора філософії
у галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

**1. Актуальність теми дисертації**

Об'єктом дослідження дисертації є блокчейн-орієнтовані комп'ютерні мережі пристроїв Інтернету речей, і саме на перетині технологій блокчейну та Інтернету речей сьогодні зосереджено значну частину досліджень розподілених систем. Досвід аналізу реальних блокчейн-мереж показує, що їхня поведінка на мережевому рівні визначає практичну застосованість платформи не менше, ніж криптографічні гарантії протоколу консенсусу. Для мереж Інтернету речей кінцеві пристрої мають жорсткі ресурсні обмеження, а канали зв'язку – суттєві затримки. Дисертант коректно зауважує, що жодна з наявних платформ не поєднує одночасно низьку затримку, підтримку апаратно обмежених пристроїв, масштабованість, безпеку, координацію вузлів для розподілу обчислювальних задач. Знайдені прогалини підтверджено аналізом 85 джерел, і саме вони визначають задум роботи. Тема є актуальною, її зміст повністю відповідає назві.

**2. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційного дослідження**

Достовірність результатів забезпечується насамперед тим, що всі запропоновані методи реалізовано у вигляді модифікацій реального програмного забезпечення та написанням окремих модулів та смарт-контрактів, що формують функціонально завершені прототипи. Експериментальна методика прозора: Docker-мережа з 15 вузлів у топології partial mesh, програмне моделювання затримок засобами Linux Traffic Control, інструментальний аналіз трафіку Edgeshark і Wireshark, поетапна активація оптимізацій з вимірюванням внеску кожної. Визначення поняття «ефективність» через підхарактеристики стандарту ISO/IEC 25010 усуває довільність у трактуванні мети та формує підхід до оцінки результатів. Узагальнення результатів і логіка викладення демонструють достатню наукову обґрунтованість.

**3. Новизна отриманих у дисертації результатів**

Науково новим є метод адаптивного консенсусу Proof of Indicators, який уперше в межах PoA-сімейства поєднує три взаємодоповнювальні механізми: динамічний вибір валідаторів за комплексною метрикою виміряної продуктивності, компактні блоки з передачею хешів транзакцій замість повних даних та конфігуровану затримку старту поширення блоків позачерговими вузлами. В результаті зменшується кількість реорганізацій ланцюга та обсяг трафіку від поширення блоків, що підтверджено експериментальними даними. Удосконалена модель гібридної тришарової архітектури цінна обґрунтованим вибором типу блокчейну для кожного рівня, а модель мультифакторного вибору периферійних вузлів – розділенням позаланцюгових (off-chain) обчислень і ланцюгової (on-chain) координації, що зберігає детермінованість смарт-контрактної логіки за лінійної обчислювальної складності. Інтегративною новизною є принцип дворівневої координації – консенсусної та ресурсної.

**4. Практична цінність отриманих результатів**

Реалізація Proof of Indicators на базі Go-Ethereum та система мультифакторного управління периферійними вузлами на смарт-контрактах Solidity і Python-агентах є компонентами, готовими до інтеграції у спеціалізовані блокчейн-мережі Інтернету речей. Орієнтація на пристрої класу Raspberry Pi і відмова від спеціалізованого обладнання знижують поріг впровадження. Самостійну практичну цінність мають результати порівняльного аналізу платформ Ethereum PoS/PoA, Hyperledger Fabric і DAG-рішень за єдиною системою критеріїв – вони можуть слугувати методичною

основою для проектувальників. Практичне значення підтверджено двома актами впровадження.

**5. Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях**

Результати, отримані в межах дисертаційного дослідження, були представлені на тематичних конференціях та опубліковані у фахових виданнях, що відповідають встановленим вимогам до наукової апробації. Публікації охоплюють ключові етапи розробки й оцінювання реалізованих систем, включаючи як концептуальні, так і технічні аспекти. Це свідчить про належний рівень відкритості дослідження та надає змогу іншим науковцям відтворити або використати результати у власних розробках.

**6. Структура та оформлення дисертації**

Структура дисертаційної роботи є логічно виваженою та відповідає основним етапам наукового дослідження: від постановки завдань і огляду літератури – до реалізації технічних рішень і аналізу результатів експериментів. Текст оформлено з дотриманням вимог до дисертаційних робіт, ілюстративний матеріал використано доречно й у достатньому обсязі для пояснення технічних аспектів. Посилання на джерела впорядковані, бібліографія охоплює як фундаментальні, так і сучасні публікації з тематики дослідження.

**7. Академічна доброчесність**

Дисертація виконує вимоги академічної доброчесності: запозичені матеріали супроводжуються належним бібліографічним апаратом, сторонні джерела належним чином оформлено, а наведені результати мають ознаки самостійно виконаного дослідження. Особистий внесок здобувача чітко окреслено, що свідчить про дотримання принципів академічної доброчесності та відповідальний підхід до представлення результатів.

**8. Зауваження та побажання**

Попри наукову та практичну цінність роботи, доцільно висловити ряд зауважень:

1. У запропонованій системі мультифакторного управління значення доступності ресурсів формуються на стороні периферійного вузла через бібліотеку psutil і передаються в смарт-контракт без криптографічної верифікації. Запровадження надійних механізмів підтвердження реального

обчислювального стану унеможливило б ситуації, коли зловмисний вузол штучно завищує свої вільні ресурси для перехоплення задач.

2. Для перевірки результатів обчислень, виконаних периферійними вузлами поза блокчейном, застосовується лише хеш-функція Keccak-256, що здатна виявити модифікацію даних, проте не замінює повноцінну верифікацію правильності самих обчислень. Інтеграція алгоритмів на зразок доказів з нульовим розголошенням (ZKP) зробила б систему більш стійкою, що цілком обґрунтовано винесено автором у перспективи досліджень.
3. Формалізація динамічного ранжування валідаторів успішно виявляє специфічні класи загроз, однак повноцінна модель безпеки з формальним математичним доведенням стійкості консенсусу Proof of Indicators до шахрайства у роботі відсутня. Її наявність зробила б теоретичне обґрунтування надійності консенсусу більш переконливим.
4. Поза розглядом залишилася поведінка PoI при одночасній відмові або компрометації значної частки валідаторів, а також стійкість зовнішнього рівня архітектури до Sybil-атак, що для відкритих p2p-мереж, де вартість створення псевдонімних вузлів низька, є одним із визначальних векторів загроз. Якісний аналіз цих сценаріїв посилив би безпекову аргументацію роботи.
5. Використання мультиплікативної композиції факторів створює жорсткий «вето-ефект», який вимагає ручного калібрування констант залежно від потреб конкретного середовища. Розроблення адаптивних ваг факторів, які б автоматично підлаштовувалися під профілі різних задач, суттєво розширило б можливості автоматичного розгортання системи.
6. Мультифакторний вибір обчислювальних вузлів спирається на реактивний моніторинг ресурсів із фіксованою періодичністю, що створює ризик прийняття рішень на основі застарілих даних,. Впровадження предиктивних моделей для прогнозування майбутнього навантаження вузла на наступний період блоку дозволило б значно скоротити кількість конфліктних призначень при пакетній подачі задач.

Зазначені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи.

**Висновок**

Дисертаційна робота Чепеля Леоніда Валерійовича є завершеним самостійним дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності функціонування блокчейн-орієнтованих мереж Інтернету речей. Робота

містить нові наукові результати, доведені до програмної реалізації на рівні реального блокчейн-стека та підтверджені експериментально, а її зміст відповідає спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія». Робота має прикладне значення, містить елементи наукової новизни, а її результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень і практичних впроваджень.

Дисертація відповідає основним вимогам до кваліфікаційних наукових робіт такого рівня, зокрема критеріям, визначеним у пунктах 6–9 «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 та вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» від 12 січня 2017 р. № 40 (у редакції від 12.07.2019).

З огляду на зміст дисертації, актуальність обраної тематики, повноту виконаного дослідження та якість публікацій, вважаю, що Чепель Леонід Валерійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія».

**Офіційний опонент**
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри штучного інтелекту та кібербезпеки
ДВНЗ «Донецький національний технічний
університет», **Ярослав ДОРОГИЙ**

**Підпис засвідчую:**
Директор
ННІ комп'ютерно-інформаційних
технологій та автоматизації
ДВНЗ «Донецький національний технічний
університет» **Едуард ПЕТЕЛІН**