

Голові спеціалізованої вченої ради

Д 41.816.01

65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Шмельової Тетяни Рудольфівни

на тему: *“Аналіз, синтез та перетворення моделей телекомунікаційних систем на основі нескінченних сіток Петрі”*,

подану на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі (172 – Телекомунікації та радіотехніка)

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

В теперішній час спостерігається новий етап розвитку телекомунікацій, який характеризується розповсюдженням нових топологічних рішень на основі ґраткових структур. Спостерігається масштабове застосування ґраткових структур від мереж-на-чипі, спеціалізованих мереж суперкомп'ютерів та кластерів, до територіально розподілених мереж операторів зв'язку, наприклад, комірчастих мереж стільникового зв'язку, телебачення та радіомовлення.

Багатовимірні ґратки, зокрема гіпертор, мають ідеальні властивості з точки зору надійності, мінімізації додаткових витрат на маршрутизацію та значного підвищення швидкості процесів, що пов'язані з маршрутизацією. Гіпертороїдальні топології забезпечують велику кількість зв'язків мінімальної відстані між двома довільними вузлами та дозволяють застосувати прості маршрутні правила для організації доставки пакетів. Таким чином, в ґратках скасовується необхідність у додаткових протоколах динамічної маршрутизації, що суттєво підвищує їх пропускну здатність.

Однак більшість відомих та застосовуваних методів аналітичного та імітаційного моделювання мереж розроблена для дослідження та проєктування мереж певної структури та визначеного розміру. Таким чином виникає необхідність у розробці принципово нових теорій, які призначені для отримання властивостей певної структури довільного розміру. Отже дисертаційні дослідження, спрямовані на верифікацію ґраткових структур за допомогою введеного у дисертації класу нескінченних сіток, є актуальними та відповідають основному виклику сучасного етапу розвитку телекомунікацій.

ОНАЗ ім.О.С.Попова
ВЛ. 01-33-398
21.11.2019

Розповсюдження мережевих технологій та їх тісна інтеграція з інформаційними технологіями сучасного суспільства з електронною комерцією, електронним урядом і використанням мереж у застосуваннях спеціального призначення для оперативного вирішення надзвичайних завдань значно підвищує вимоги до надійності сучасних мереж. Кібербезпека також може розглядатися як один із аспектів надійності по відношенню до втручання зловмисників та відповідних зловмисних програмних та апаратних засобів. В основі мережних технологій лежать певні телекомунікаційні протоколи стандартизовані у відповідних документах. Отже актуальності набувають методи верифікації телекомунікаційних протоколів, удосконаленню яких присвячена дисертаційна робота.

Розповсюдження керованої моделлю розробки телекомунікаційних мереж ставить нові вимоги до можливості повторного застосування результатів, швидкої модифікації та аналізу властивостей моделі. Традиційні графічні засоби моделювання мереж поруч із значними перевагами мають суттєвий недолік необхідності повної перебудови моделі для кожної окремої заданої структурної схеми мережі. Таким чином, запропонований у дисертаційній роботі новий клас реєнтерабельних моделей спрямований на подолання цього недоліку, що свідчить про актуальність теми дисертаційної роботи.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 235 найменувань і чотирьох додатків. Зміст та структура роботи у повній мірі відповідають завданню з викладення основних результатів вирішення поставленої наукової проблеми та сформульованим окремим завданням дослідження, які відповідають паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

В першому розділі виконано аналіз сучасних тенденцій розвитку телекомунікацій і аналітичних та імітаційних методів їх моделювання, спрямованих на верифікацію протоколів і оцінку ефективності мереж. Сучасні тенденції характеризуються появою та розповсюдженням нових типів мереж, таких як мережі на чипі, які зв'язують ядра та інші функціональні складові процесорів, мережі суперкомп'ютерів і кластерів, які трансформуються в обчислювальні ґратки та хмари, а також мережі з регулярною структурою операторів зв'язку, наприклад, стільникового. Отже розповсюдження мереж нового типу, особливо із топологією у вигляді плоских та багатовимірних ґраток, обумовлюють необхідність розробки нових теорій для верифікації протоколів та оцінки їх ефективності. Два основних виклики формують проблему, яка вирішена у наступних розділах: верифікація не певних мереж, а мережних структур та технологій; побудова моделей для керованої моделлю розробки, які не вимагають перекомпонування моделі в процесі вибору оптимальної структурної схеми та використаного обладнання і програмного забезпечення.

В другому розділі запропонований новий клас моделей для верифікації протоколів, які передбачають взаємодію довільної кількості пристроїв, – нескінченна сітка Петрі. Побудована спеціальна математична нотація у вигляді параметричної системи перезапису мультимножин. Отримано пряме параметричне подання ґраток і побудована модель прямокутної обчислювальної ґратки на площині та у багатовимірних просторах. На прикладі прямокутної комунікаційної ґратки розроблено методи синтезу моделі у вигляді нескінченної сітки Петрі, поданої скінченною специфікацією. Синтезовано моделі трикутних і шестикутних ґраток на площині, гіперкубі та гіперторі у багатовимірних просторах. Крім того розглянуто низку реалістичних крайових умов ґраток та архітектурні особливості комутуючих пристроїв.

В третьому розділі розроблено методи аналізу властивостей нескінченних сіток Петрі для верифікації протоколів комунікаційних ґраток. Основна група методів спрямована на розв'язання у параметричному вигляді нескінченних діофантових систем лінійних алгебраїчних рівнянь для пошуку інваріантів позицій та переходів нескінченних сіток Петрі; інваріантні сітки мають низку властивостей моделі ідеального протоколу – обмеженість, консервативність, стаціонарну повторюваність. Додаткова група методів оснований на спеціально введених графах передач та блокувань. Граф передач застосовано для явного доказу стаціонарної повторюваності, граф блокувань використано для опису складних тупиків в ґратках. Запропоновано евристичний алгоритм побудови параметричного розв'язку нескінченних діофантових систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Сформульовані та доведені теореми відносно параметричних розв'язків системи нескінченних діофантових систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

В четвертому розділі введено новий тип реєнтерабельних моделей, призначених для застосування у керованій моделлю розробці телекомунікаційних систем та мереж. Розроблено методологію побудови реєнтерабельних моделей телекомунікаційних систем та мереж на основі комутації тегів. Реєнтерабельна модель містить підмодель кожного типу пристрою в одному екземплярі; структура мережі та характеристики обладнання і програмного забезпечення подано як маркування певних позицій. Кожний динамічний елемент такої моделі позначений спеціальним тегом, який задає положення в фактичній структурній схемі; перемикування топологічних тегів супроводжує процес імітаційного моделювання. Перевагами реєнтерабельних моделей є фіксована структура, що значно зменшує розмір моделі та прискорює процеси імітаційного моделювання і внаслідок чого скорочується загальний час розробки та модифікації моделі.

На основі введених реєнтерабельних моделей в класі розфарбованих сіток Петрі виконано побудову наступних базових моделей: IP-мережі з динамічною маршрутизацією RIP, мереж MPLS, PBB і обчислювальних ґраток.

В п'ятому розділі запропоновані методи перетворення моделей нескінчених сіток Петрі в розфарбовані сітки Петрі, розфарбованих сіток Петрі в реєнтерабельні розфарбовані сітки Петрі. Дослідження властивостей складних моделей, з урахуванням взаємодії необмеженої кількості пристроїв та їх різних

комбінацій, виконано для моделей комунікаційних ґраток в формі нескінченних сіток Петрі з регулярною структурою. Введення взаємних перетворень нескінченних сіток Петрі та реєнтерабельних розфарбованих сіток Петрі забезпечує наступність класів моделей одного загального сімейства. Це дозволяє вирішувати комплексно складні завдання верифікації протоколів та оцінки ефективності систем та мереж у керованій моделлю розробці. Крім того у розділі вдосконалені вимірювальні компоненти моделей у вигляді розфарбованих сіток Петрі відносно особливостей реєнтерабельних моделей. Вимірювальні компоненти забезпечують розрахунки необхідних показників пропускну здатності та якості обслуговування безпосередньо у процесі імітаційного моделювання. Також підтверджено уразливість ґраток до атак шляхом утворення тупикових конфігурацій через замаскований трафік низької інтенсивності.

В шостому розділі розроблено комплекс програмного забезпечення для автоматичного синтезу моделей у вигляді шестикутних ґраток і гіперкубу та гіпертору. Розроблено методи перетворення моделей телекомунікаційних систем та мереж із регулярною структурою у двоїсте параметричне подання. Для порівняння отриманих результатів розроблено засоби перетворення моделей у специфікації на основі алгебри процесів. Крім того для додаткового підтвердження і порівняння результатів розроблено моделі ґраток у вигляді числення процесів та відповідної мови mCRL2.

Висновки дисертаційної роботи підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Основні результати мають як якісний характер – нові нескінченні сітки Петрі дозволяють розв'язати завдання, для яких не було відомих методів розв'язання, так і кількісний характер у вигляді скорочення строків розробки моделей в півтора рази.

3. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Тематика дисертаційних досліджень відповідає напрямкам розвитку телекомунікацій, сформульованим у «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні». Концепція розвитку телекомунікацій в Україні, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 червня 2006 р., N 316-р (із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ N 1612-р (1612-2008-р) від 27.12.2008).

Наукова новизна отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

1. Вперше розроблені методи синтезу моделей телекомунікаційних протоколів, які описують взаємодію довільної кількості пристроїв в формі нескінченних сіток Петрі за стандартними вербальними специфікаціями протоколів; синтезовані моделі мереж з регулярною структурою на площині та в багатовимірному просторі; новизною методів є специфікація множини структурних схем телекомунікаційних мереж в єдиному параметричному виразі, що дозволяє узагальнити синтезовані моделі відносно до певної мережевої технології незалежно від структури мережі.

2. Вперше для специфікації комунікаційних ґраток стільникового зв'язку, ефірного мовлення та розподілених обчислень розроблена спеціальна система означень (нотація) параметричних виразів для систем перезапису мультимножин, що дозволяє виконати скінченне подання нескінченних сіток Петрі в прямій і двоїстій формах. Новизною нотації у відношенні до класичних систем перезапису мультимножин є довільна кількість елементів, яка подана через використання додаткових нерівностей та функцій, заданих на множині параметрів, що дозволяє отримати скінченну специфікацію нескінченних мереж певної структури.

3. Вперше для верифікації телекомунікаційних протоколів розроблені методи композиції нескінченних систем діофантових лінійних рівнянь за параметричними виразами, а також методи отримання загальних розв'язків таких систем для доведення властивості інваріантності моделей; отримано параметричні розв'язки для комунікаційних ґраток, що дозволяє довести інваріантність відповідних моделей; новизною композиції нескінченних систем по відношенню до класичних нескінчених систем функціонального аналізу є відсутність граничного переходу у поданні та розв'язанні системи, що являє собою більш загальні методи, придатні до застосування у дискретних просторах (ґратках).

4. Вперше запропоновані спеціальні графи передач і взаємних блокувань для прискореного аналізу простору станів моделей комунікаційних ґраток, які агрегують скінченні і нескінченні підмножини станів в вершини графа, що дозволило виявити, класифікувати і уточнити тупики в моделях комунікаційних ґраток, а також отримати схеми (графи) повного блокування ґраток; новизною запропонованих графів є спрощене подання суттєвих властивостей моделей телекомунікаційних систем у формі сіток Петрі, яке дозволяє застосувати формальні методи теорії графів для доведення коректності протоколів та класифікації потенційних загроз блокування інформаційного обміну.

5. Отримали подальший розвиток методи моделювання телекомунікаційних протоколів і пристроїв, які відображають їх архітектурні особливості, такі як режими передачі, режими комутації, значення ключових полів заголовків повідомлень; новизною рішень є подання сучасних можливостей телекомунікаційних пристроїв, що дозволяє підвищити адекватність побудованих моделей і точність отриманих оцінок продуктивності та якості обслуговування мереж.

6. Вперше для специфікації телекомунікаційних мереж і обчислювальних ґраток, інваріантних по відношенню до топології мережі, продуктивності комунікаційних і обчислювальних вузлів, каналів зв'язку запропоновано клас реєнтерабельних моделей в формі розфарбованих сіток Петрі; новизною реєнтерабельної моделі є додаткові засоби прив'язки динамічних об'єктів до топологічної схеми мережі, що дозволяє отримати модель, яка містить кожний компонент у єдиному екземплярі та параметр, який подає топологію мережі; побудована модель відповідає певній технології, а не топологічній схемі мережі.

7. Вперше розроблені методи синтезу реєнтерабельних моделей за вихідними вербальними специфікаціями технологій і традиційними моделями, побудованими на основі прямого відображення елементів топології; синтезовані реєнтерабельні моделі IP, MPLS та PBB мереж за вихідними традиційними моделями, динамічної маршрутизації IP-мереж за вихідними стандартними

специфікаціями протоколу RIP; новизною методів синтезу реєнтерабельних моделей є застосування вихідної інформації у вигляді стандартів мереж та традиційних моделей, зокрема, у вигляді розфарбованих сіток Петрі, що дозволяє автоматизувати процес синтезу моделей.

8. Вперше розроблені методи прямого та зворотного перетворення нескінченних сіток Петрі і реєнтерабельних моделей комунікаційних ґраток; за допомогою прямого перетворення синтезовані реєнтерабельні моделі прямокутних комунікаційних ґраток; зворотні перетворення, які пов'язані із частковою втратою інформації, дозволяють застосувати формальні методи верифікації ґраток; новизна методів взаємних перетворень полягає у використанні нових класів моделей у вигляді нескінченних та реєнтерабельних сіток Петрі, що дозволяє отримати сімейство формальних засобів специфікації різного ступеню деталізації для комплексного розв'язання задач доведення коректності та оцінки ефективності телекомунікаційних мереж.

9. Набув подальшого розвитку метод вимірювальних компонентів стосовно реєнтерабельних моделей в формі розфарбованих сіток Петрі, який дозволяє отримувати оцінки функціональних характеристик мереж безпосередньо в процесі імітаційного моделювання без збереження проміжної статистичної інформації; розроблені типові вимірювальні компоненти реєнтерабельних моделей для оцінки пропускнуої здатності мережі, середнього часу доставки пакета, дисперсії часу доставки пакета (джитера) і відсотка втрачених пакетів, зазначені компоненти використані для оцінки ефективності технологій MPLS і PBB, впливу тупиків на продуктивність обчислювальних ґраток; новизною вимірювальних компонентів реєнтерабельних моделей є використання засобів прив'язки динамічних елементів до топологічних схем моделей, що дозволяє використовувати єдину вимірювальну компоненту для усієї множини однотипних пристроїв.

10. Вперше розроблені методи дослідження впливу зловмисного трафіка на продуктивність і якість обслуговування мережі для реєнтерабельних моделей обчислювальних ґраток, з метою підвищення безпеки мереж; виявлені прості конфігурації замаскованої зловмисної активності низької інтенсивності, які призводять до повного блокування ґратки; новизна методів дослідження впливу зловмисного трафіка полягає у виявленні нових типів атак на мережу через застосування системи взаємодіючих джерел зловмисного трафіка, замаскованого під мультимедійний потік, що дозволяє протидіяти більш досконалим втручанням через програмування взаємних блокувань пристроїв комутації та маршрутизації мереж; розроблені алгоритми автоматичного синтезу специфікацій моделей обчислювальних ґраток в формі нескінченних сіток Петрі, перетворення прямої і двоїстої форм подання сіток Петрі для подальшої програмної реалізації; новизна розроблених алгоритмів полягає у використанні нових класів моделей мереж у вигляді нескінченних сіток Петрі, що дозволяє підвищити обчислювальну ефективність та скоротити час доведення коректності телекомунікаційних протоколів.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність

Сформульовані у дисертаційній роботі нові наукові положення, висновки і рекомендації ґрунтуються на фундаментальних фізичних та загальнонаукових принципах, викладених у класичних монографіях та наукових публікаціях, на які є відповідні посилання.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, визначається наступним:

- теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях і не суперечать відомим науковим фактам;
- теоретичні результати обґрунтовані коректним використанням математичного апарату – методів лінійної алгебри, теорії графів та мультимножин;
- отримані нові результати гармонійно розвивають і узагальнюють методи та моделі верифікації телекомунікаційних протоколів сітками Петрі через введення нового класу нескінченних сіток;
- проведені теоретичні дослідження не суперечать відомим положенням;
- підтвердженням висунутих гіпотез за допомогою методів імітаційного моделювання та вимірами характеристик реальних мереж;
- результати, що отримані за допомогою реентерабельних моделей, збігаються з результатами, отриманими за допомогою традиційних моделей;
- матеріали дисертації доповідалися і обговорювалися на 14 міжнародних та всеукраїнських конференціях, а також на 3 спеціалізованих семінарах у провідних університетах Європи, та отримали позитивну оцінку провідних фахівців та науковців у галузі телекомунікацій.

5. Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі, та зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами

Робота виконана в рамках Міжнародної наукової-дослідної роботи «Моделювання обчислювальних ґраток розфарбованими сітками Петрі» Україна-Австрія; міжнародних програм розробки бібліотек моделей університету Париж-6, Франція, Лабораторії архітектур систем, Тулуза, Франція; Технологічного університету Ейндховена, Нідерланди; державних науково-дослідних робіт: «Розробка нових систем адресації глобальних мереж»; «Аналіз ефективності обчислювальних ґраток розфарбованими сітками Петрі»; «Удосконалення технологій побудови та методів проектування телекомунікаційних мереж із використання адекватних математичних моделей трафіка».

Практичне значення дисертаційних досліджень полягає у наступному:

1. У дисертаційній роботі розроблено методи, моделі та алгоритми верифікації протоколів з необмеженою (довільною) кількістю взаємодіючих пристроїв нескінченними сітками Петрі. Виконано синтез моделей і верифікацію трикутної, прямокутної, шестикутної комунікаційних ґраток на площині, гіперкубі і гіперторі в багатовимірних просторах.

2. Розроблено методи, моделі та алгоритми оцінки ефективності телекомунікаційних мереж, обчислювальних кластерів і ґраток реєнтерабельними моделями в формі розфарбованих сіток Петрі, що дозволяє скоротити час розробки і аналізу моделей за рахунок інваріантності заданій топології.

3. Виконано автоматизований синтез моделей для оцінки ефективності технологій IP, MPLS, PBB і прямокутних обчислювальних ґраток. Розроблено програмне забезпечення для синтезу і перетворення моделей. Розроблені бібліотеки моделей схвалено та розповсюджуються розробниками моделюючих систем з Франції (Tina) та Нідерландів (CPN Tools). Програмне забезпечення розповсюджується через портал GitHub.

4. Застосування запропонованих методів і моделей дозволило скоротити терміни проектування мереж і підвищити достовірність попередніх оцінок пропускну здатності і якості обслуговування.

6. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

Основні положення та висновки дисертаційної роботи опубліковано в 43 наукових працях, серед яких 1 глава в колективній монографії (енциклопедії), 24 наукових статті, з них 7 індексуються наукометричними базами Scopus та WoS, та 17 у наукових фахових виданнях України. Наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 14 міжнародних та всеукраїнських конференціях, матеріали 7 з яких індексуються наукометричними базами Scopus та WoS. Слід окремо відзначити публікацію з імпаکت фактором у відомому світовому журналі Cluster Computing, присвячену аспектам кібербезпеки прямокутних комунікаційних ґраток.

Зазначені публікації повною мірою висвітлюють основні наукові положення дисертації як на вітчизняному, так і на міжнародному рівнях.

7. Зауваження до дисертаційної роботи та автореферату

1. Недостатньо повно представлені особливості формування трафіка мереж та ґраткових структур. Відомо, що трафік в мережах пакетної комутації має самоподібний характер. Але в дисертаційній роботі не представлені дослідження різноманітних типів мережних застосувань та сервісів для самоподібного трафіка.

2. В роботі побудовано моделі тільки для дистанційно-векторних протоколів, зокрема RIP, в той час як протоколи інших типів знаходять широке застосування у сучасних мережах. Доцільно було би виконати дослідження побудованих моделей для протоколів типу link state – протоколу OSPF, коли застосовується багатошляхова маршрутизація, а також комплексна метрика, що характеризує маршрут.

3. В роботі слід було би визначити, що являє собою «ефективність мереж». Судячи з тексту дисертації, показником ефективності вважається пропускна здатність, але відсутнє обґрунтування вибору саме цього показника у якості показника «ефективність мереж». Визначення ефективності було б доцільним для подальшого систематичного вивчення мережних та ґраткових технологій.

4. В роботі для різних моделей розраховуються такі показники якості: середній час доставки пакетів, джитер (дисперсія) та кількість втрачених пакетів. Доцільно було би перелік показників якості визначити на основі рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку: ITU-T Y.3001, ITU-T Y.1540 та ITU-R E-800.

5. Серед показників надійності у дисертаційній роботі надано тільки показник – коректність протоколів мереж та ґраток, що доводиться за допомогою процедур верифікації із використанням алгебраїчних методів сіток Петрі, але надійність роботи мереж не вичерпується лише цим аспектом. Доцільним вважається більш узагальнене дослідження показників надійності. Тобто бажано було навести показники структурної та функціональної надійності.

6. В дисертаційній роботі відсутні кількісні оцінки переваг запропонованих моделей – нескінчених сіток Петрі, ресентерабельних моделей – перед відомими моделями.

7. Здається доцільним використання технологій штучного інтелекту, зокрема, нейронних мереж, для розпізнавання та подолання аномалій у функціонуванні мереж (розділ 5) – блокування мереж через замаскований трафік низької інтенсивності.

8. В роботі розглянуто множину типів плоских та багатовимірних ґраток, однак недостатньо уваги приділено критеріям вибору конкретних різновидів ґраток для реалізації заданих видів сервісу.

9. В роботі недостатньо уваги приділяється аспектам практичного застосування розроблених методів і моделей в діяльності конкретних телекомунікаційних операторів з урахуванням особливостей їх функціонування.

8. Відповідність дисертації встановленим вимогам і загальні висновки

Дисертаційна робота Шмельової Тетяни Рудольфівни на тему “Аналіз, синтез та перетворення моделей телекомунікаційних систем на основі нескінчених сіток Петрі” є завершеним науковим дослідженням.

У роботі вирішено важливу наукову проблему верифікації протоколів і оцінки ефективності телекомунікаційних систем і мереж з довільною

(необмеженою) кількістю взаємодіючих елементів на основі нових теорій нескінченних сіток Петрі та реєнтерабельних моделей.

1. Дисертація відповідає спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

2. Автореферат дисертації об'єктивно і достатньо повно відображає зміст, а також основні положення та висновки дисертації.

3. Матеріали дисертації опубліковані у 43 наукових працях, серед яких 1 глава в колективній монографії (енциклопедії), 24 наукових статті, з них 7 індексуються наукометричними базами Scopus та WoS, та 17 у наукових фахових виданнях України. Наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 14 міжнародних та всеукраїнських конференціях, матеріали 7 з яких індексуються наукометричними базами Scopus та WoS.

4. Незважаючи на вищезазначені недоліки та зауваження, можна зробити висновок про те, що дисертаційна робота Шмельової Тетяни Рудольфівни на тему “Аналіз, синтез та перетворення моделей телекомунікаційних систем на основі нескінченних сіток Петрі” є завершеним дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу наукову проблему верифікації протоколів і оцінки ефективності телекомунікаційних систем і мереж з довільною (необмеженою) кількістю взаємодіючих елементів на основі нових теорій нескінченних сіток Петрі та реєнтерабельних моделей.

5. Розглянута дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, пп. 11 – 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 656 від 19.08.2015. що ставляться до докторських дисертацій, а її автор – Шмельова Тетяна Рудольфівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент

Професор кафедри «Комп'ютерної інженерії»
Одеської національної академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України,
д. т. н., професор

Н. О. Князева

