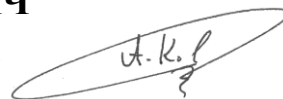


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КОВАЛЕНКО АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 004.415:004.051-021.412.1(043.3)

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ СИНТЕЗУ І РЕКОНФІГУРАЦІЇ
АРХІТЕКТУР КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ І МЕРЕЖ
ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Кучук Георгій Анатолійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри обчислювальної
техніки і програмування.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Єременко Володимир Станіславович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри
інформаційно-вимірювальної техніки;

доктор технічних наук, професор
Лужецький Володимир Андрійович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри захисту інформації;

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Чемерис Олександр Анатолійович,
Інститут проблем моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова НАН України,
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться «01» листопада 2018 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «20» вересня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.Г. Ліберг

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сталий розвиток сучасного суспільства залежить від надійного й безпечного функціонування об'єктів критичного застосування (ОКЗ) та відповідних систем управління, які містять в своїй основі різноманітні комп'ютерні системи (КС). Відмови, аварії та збої таких КС ОКЗ можуть задавати шкоди економіці, навколишньому середовищу, здоров'ю та життю населення. На сьогодні існує велика кількість класів ОКЗ (пов'язаних з транспортною, аерокосмічною, переробною та іншими галузями), до найбільш важливих з яких належать об'єкти енергетики, що є об'єднаними у безперервному процесі виробництва, передавання та розподілу електроенергії між виробниками та користувачами.

Сучасні КС ОКЗ характеризуються високою інтенсивністю інформаційних потоків та поступовим підвищенням вимог до оперативності передачі інформації. Виконання таких вимог нерозривно пов'язане з потребами реалізації та впровадження світового досвіду і суцільно залежить від передових технологій, пов'язаних з передачею та обробкою інформації. Сучасні технології побудови комп'ютерних систем та мереж дозволяють створювати продуктивні, надійні і захищені мережі, однак, у реальних КС ОКЗ у більшості випадків практично неможливо забезпечити необхідний час реакції, оскільки треба задовольнити відповідні вимоги до принципово різних компонентів та процесів, водночас враховуючи їх природу та характеристики. Таким чином, розв'язання зазначених проблем не є можливим без створення і впровадження ефективних технологій побудови КС, що дозволяють забезпечувати певні показники ресурсів для надання якісних послуг у відповідності до вимог, котрі висуваються при управлінні об'єктами критичного застосування.

Однією з надзвичайно важливих характеристик КС ОКЗ є її архітектура, яка є визначальною для параметрів її компонентів (систем і мереж). Сучасні теоретичні розробки у даному напрямі налічують як значний теоретичний матеріал, так і ґрунтовний практичний досвід. Найбільш важливими роботами в цьому напрямі є дослідження зарубіжних і вітчизняних вчених, серед яких варто виділити наступних: Д. Бертсекас, Р. Бесслер, В.М. Вишневецький, В.С. Заборовський, Ю.П. Зайченко, О.М. Назаров, Ю.М. Чернишов, А.А. Сирота, В.С. Харченко, О.І. Шелухін, М.А. Ястребенецький, В.К. Стеклов, Д. Уолренд, С. Лоу, Р. Морріс, С. Флойд, Д. Кларк, Д. Катабі, Е. Таненбаум, В. Столлінгс, С. Сундарсан, Г. Ван.

В рамках багатьох сучасних галузей розроблено, впроваджено і експлуатується велика кількість комп'ютерних систем, що, в свою чергу, дозволяє проаналізувати результати їх функціонування і відокремити певні переваги та недоліки. Існує неминучий компроміс між кількістю функцій відповідних КС, їх універсалізацією і реаліями при реалізації конкретних комп'ютерних мереж (КМ). Даний компроміс повинен бути шляхом до вирішення технічного протиріччя між тенденцією збільшення топологічної складності комп'ютерних мереж розподілених КС, підвищенням кількості інформації, що передається, та вимог до оперативності обміну інформацією в

КС ОКЗ і відсутністю науково обґрунтованого концептуального підходу до синтезу та реконфігурації архітектур комп'ютерних систем і мереж, орієнтованого на ефективне виконання прикладних задач КС ОКЗ.

Крім того, в Україні не розроблено єдиний комплексний підхід до синтезу і реконфігурації архітектур КС ОКЗ, тому, вважаючи на вищенаведене, є необхідною розробка єдиної методологічної основи з урахуванням особливостей та специфіки ОКЗ. Отже, незважаючи на різноманіття зарубіжних і національних підходів до вирішення проблеми забезпечення вимог з оперативності процесу обміну інформацією в КС і мережах (КСіМ) ОКЗ, аналіз існуючих підходів показує, що на сьогодні не повною мірою вирішено низку актуальних питань, пов'язаних з важливими теоретичними аспектами й практичною реалізацією забезпечення вимог з оперативності процесу обміну інформацією. Таким чином, зараз має місце така **суперечність**: одночасно з істотним підвищенням вимог до оперативності передачі інформації, необхідної для функціонування ОКЗ, швидкого прийняття і доведення до виконавців рішень, відбувається збільшення обсягів інформації, яка передається і оброблюється, внаслідок чого якісно і кількісно змінюються структура і характер інформаційних потоків, але зміни не враховуються існуючими моделями та методами, які використовуються в сучасних КС ОКЗ, що призводить до суперечності між нестабільними значеннями часових параметрів процесів обміну і обробки інформації, котрі викликані гетерогенністю і варіаціями структури потоків, з одного боку, і жорсткими вимогами до оперативності процесів обміну і обробки інформації, з іншого боку.

Подолати цю суперечність можна шляхом вирішення **актуальної науково-прикладної проблеми** забезпечення вимог з оперативності процесу обміну інформацією в КС ОКЗ на основі розробки математичного апарату (математичних моделей і методів) синтезу нових і реконфігурації існуючих архітектур комп'ютерних систем і мереж.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту» (ДР № 0116U002539); «Наукові основи, методи та засоби зеленого комп'ютингу та комунікацій» (ДР № 0115U000996); «Методологія сталого розвитку та інформаційні технології зеленого комп'ютингу та комунікацій» (ДР № 0118U003822), у яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є підвищення оперативності передачі інформації в комп'ютерних системах об'єктів критичного застосування шляхом розробки моделей і методів синтезу і реконфігурації комп'ютерних систем та мереж.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були сформульовані такі завдання:

- 1) аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку КС ОКЗ та відповідних основних факторів і підходів, вимог до їх архітектур;
- 2) аналіз існуючих моделей і методів дослідження процесів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ;
- 3) розроблення моделей підтримки синтезу архітектур КСiМ ОКЗ;
- 4) розроблення методів синтезу архітектури КСiМ ОКЗ з врахуванням реалізації методів розв'язання вхідних задач, вимог до компонентів, розподілу задач по компонентах, критерію якості і можливих обмежень;
- 5) розроблення моделей підтримки реконфігурації архітектур КМ ОКЗ;
- 6) розроблення методів реконфігурації архітектур КМ ОКЗ з врахуванням задач моделювання трафіку, управління трафіком, чергами, навантаженням вузлів, маршрутами та пропускнуою здатністю;
- 7) проведення порівняльної оцінки розроблених та існуючих моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ;
- 8) дослідження та впровадження розроблених моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ.

Об'єктом дослідження є процес передачі інформації в комп'ютерних системах об'єктів критичного застосування.

Предметом дослідження є моделі та методи синтезу і реконфігурації архітектур комп'ютерних систем і мереж.

Методи дослідження. При розв'язанні науково-прикладної проблеми було використано широкий спектр методів. Так, при розробці математичних моделей підтримки синтезу та реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ використовувався теоретико-множинний підхід, методи теорії масового обслуговування, оптимізаційні моделі та методи дослідження операцій. При розробці методів синтезу та реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ використовувалися методи теорії інформації та теорії складних систем, методи функціонального аналізу. Оцінка експериментальних даних, отриманих у ході роботи, проводилася на основі методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена розробленими моделями та методами синтезу і реконфігурації архітектур комп'ютерних систем і мереж об'єктів критичного застосування, котрі надали подальший розвиток відповідному науковому напрямку та в межах яких отримані такі нові наукові результати:

вперше розроблені:

- комплекс методів багатопараметричного синтезу архітектур комп'ютерних систем і мереж об'єктів критичного застосування, який базується на їх стратифікації на інформаційному та технічному рівнях та оптимізує витрати на побудову компонентів комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування, котрі забезпечують виконання вимог з оперативності;
- комплекс моделей еволюції архітектур комп'ютерних мереж об'єктів критичного застосування, який враховує динаміку розвитку комп'ютерної системи і базується на балансуванні навантаження мереж, що дозволяє виконати прогноз змін архітектури мережі протягом фіксованого часового інтервалу;

– комплекс методів реконфігурації комп'ютерних мереж об'єктів критичного застосування, який враховує специфіку трафіку та характерних для об'єктів критичного застосування процесів в мережі і базується на використанні кратномасштабного дискретного вейвлет-перетворення, що дозволяє скорегувати множину параметрів функціонування бездротових компонентів мережі для зменшення часу передачі інформації;

удосконалені:

– математична модель функціонування хмарної компоненти комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування, яка відрізняється від відомих механізмом врахування зміни довжини пакету з використанням перетворення Лагранжа, що дозволяє прискорити процес передачі інформації;

– метод побудови оптимальних часових шкал для апроксимації довжини черг комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування, який відрізняється від відомих використанням результатів короткострокового прогнозу поведінки трафіку, що дозволяє визначити довжину черг при реконфігурації мережі;

– метод передачі інформації у бездротовому сегменті комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування, який відрізняється від відомих врахуванням події «хендовер», що призводить до зменшення часу передачі інформації;

дістала подальшого розвитку:

– модель процесу розподілу задач по компонентах розподіленої комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування за рахунок декомпозиції глобальної оптимізаційної задачі на окремі підзадачі, що дозволяє при великих розмірностях суттєво прискорити рішення відповідної задачі оптимізації.

Достовірність нових наукових положень і висновків дисертаційної роботи підтверджується:

– збіжністю результатів експериментальних досліджень, отриманих при програмній реалізації розроблених моделей та методів, з теоретичними і практичними результатами, відображеними в публікаціях, і обумовлена їх відповідністю до положень теорії синтезу і реконфігурації складних структур;

– зведенням розроблених моделей до відомих та апробованих моделей при граничних значеннях параметрів, які було враховано при їх розробленні;

– обґрунтованістю припущень, зроблених при розробленні моделей і методів, виходячи з досвіду експлуатації комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування;

– результатами практичного впровадження моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур комп'ютерних систем і мереж об'єктів критичного застосування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені у роботі моделі та методи є науково-практичною основою для синтезу і реконфігурації архітектур комп'ютерних систем і мереж об'єктів критичного застосування. Представлені на їх основі інженерні методи та алгоритми дають змогу:

- виконати синтез архітектури комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування і отримати її формальний опис;
- оптимізувати розподіл задач по компонентах розподіленої комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування і отримати відповідний кортеж розподілу;
- виконати моделювання процесу еволюції архітектур комп'ютерних мереж об'єктів критичного застосування із врахуванням динаміки розвитку комп'ютерної системи;
- зменшити час передачі інформації у бездротових компонентах комп'ютерних мереж об'єктів критичного застосування на 10-20%;
- підвищити оперативність транзакцій комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування за рахунок зменшення часу їх виконання в порівнянні з існуючими комп'ютерними системами на 5-15% шляхом реалізації розроблених моделей та методів.

Результати досліджень впроваджено: в Державному підприємстві «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості» (м. Харків) при виконанні науково-дослідної роботи за темою «Розробка проектної документації на створення авіаційного комплексу з розробки, виробництва і ремонту авіаційних двигунів» (акт впровадження від 21.09.2017 р.); в Державному підприємстві «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування» при виконанні науково-дослідної роботи (акт впровадження від 19.03.2018 р.); в ТОВ «НВП «Радікс» (м. Кропивницький) в рамках створення, конфігурації та підготовки до сертифікації систем на програмованій логіці на базі платформи RadICS, а також при розробленні нормативних документів підприємства стосовно процесів розробки та верифікації інформаційно-керуючих систем (акт впровадження від 20.02.2018 р.); у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки (акт впровадження від 17.10.2017 р.); при виконанні НДР Харківського національного університету радіоелектроніки (акт впровадження від 17.01.2018 р.); у навчальному процесі і НДР Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» (м. Харків) (акт впровадження від 27.04.2018 р.); при виконанні міжнародних проектів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» (м. Харків) (акт впровадження від 12.02.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто, серед них: дослідження нових принципів та підходів до синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ; розробка нових моделей та методів, що реалізують ці принципи та дозволяють підвищити оперативність КС ОКЗ; проведення експериментальних досліджень розроблених моделей та методів; участь у впровадженні результатів дисертаційних досліджень. Особистий внесок здобувача у наукових працях, написаних у співавторстві, зазначений у списку опублікованих праць за темою дисертації та відповідає темі та змісту дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися, обговорювалися та були визнані на таких науково-технічних

конференціях і симпозиумах: «Проблеми інформатики і моделювання» (м. Харків, 2009 р.); «Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку» (м. Київ, 2010 р.); «Statistical Methods of Signal and Data Processing» (м. Київ, 2010 р.); «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Київ, 2011 р., м. Полтава, 2015 р.); «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 2012 р.); «Dependability and Complex Systems (DepCoS-RELCOMEX)» (м. Брунов, Польща, 2012 р.); «Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем» (м. Алушта, 2012 р., м. Харків 2014 р.); «Проблеми інформатизації» (м. Черкаси, 2013 р., м. Київ, 2014 р.); «Critical Infrastructure Safety and Security» (м. Севастополь, 2013 р.); «DEpendable Systems, SERvices and Technologies» (м. Київ, 2014 р.); «International Conference on Nuclear Engineering» (м. Прага, Чехія, 2014 р.); «Nuclear Plant Instrumentation, Control & Human-Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT)» (м. Сан-Дієго, США, 2012 р., м. Шарлотт, США, 2015 р., м. Сан-Франциско, США, 2017 р.); «IEEE East-West Design and Test Symposium» (м. Харків, Україна, 2012 р., м. Батумі, Грузія, 2015 р., м. Єреван, Вірменія, 2016 р.); «Information and Digital Technologies» (м. Жиліна, Словаччина, 2015 р., 2017 р.).

Публікації. Результати наукових досліджень відображено в 59 друкованих працях, зокрема в 4 колективних монографіях (всі внесені до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS), 34 статтях у наукових фахових, наукових виданнях України та інших держав (з них 29 – у наукових фахових виданнях України, одна – в закордонному журналі, 4 – у наукових виданнях України, 11 – у виданнях, які внесено до міжнародних наукометричних баз), 21 публікація в матеріалах міжнародних наукових конференцій, з них 9 внесені до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій двома мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 379 сторінок; робота містить 66 рисунків (з них 9 на окремих сторінках); 2 таблиці; список використаних джерел, що включає 336 найменувань на 36 сторінках; 4 додатки на 36 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційних досліджень, сформульовано її мету та задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У першому розділі проведено аналіз науково-прикладної проблеми, досліджено сучасний стан та тенденції розвитку КС ОКЗ, а також вимоги до архітектур КС і КМ ОКЗ. Проаналізовано сучасне базове технічне та програмне забезпечення КС ОКЗ. На основі аналізу сформульовано загальні вимоги до КС ОКЗ та їх компонент. Визначені тенденції розвитку та існуючі потреби. Зроблено висновок, що сучасною тенденцією комп'ютерних мереж КС ОКЗ є

збільшення обсягів інформації, що передається між компонентами архітектури. Окрім цього, вимоги до оперативності і своєчасного прийняття рішень постійно стають більш жорсткими. В КМ спостерігається істотна нестаціонарність інформаційних потоків, коли інтенсивність в певні періоди часу істотно відхиляється від середньостатистичних значень. Однак, вимоги до надійності і продуктивності, які висуваються до КС ОКЗ, що проектується, також є жорсткими. Як показують теоретичні й експериментальні дослідження процесів обміну інформацією в КМ ОКЗ, агрегований трафік має унікальні характеристики з певними флуктаціями у вигляді коротких інтенсивних сплесків на тлі відносно низького середнього рівня, що призводить до збільшеного коефіцієнту відхилення пікових значень інтенсивності трафіку. Це значно погіршує характеристики (збільшує втрати та час затримок) навіть у випадках, коли середня інтенсивність трафіку набагато нижче потенційно досяжної швидкості передачі в каналі.

Також сформульовано вимоги до архітектур КС ОКЗ, проаналізовано особливості їх інформаційного забезпечення, базове забезпечення та визначено відповідні фактори впливу. Крім того, проаналізовано основні методи управління архітектурами КС ОКЗ. Виділено та сформульовано загальні підходи до оптимізації архітектур, досліджено методи аналізу архітектур та методи аналізу інформаційних потоків.

Другий розділ присвячено дослідженню моделей та методів підтримки процесів синтезу та реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ. Досліджено методів рішення задач оптимізації процесів формування та зміни архітектур з метою подальшої розробки методів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ, основною умовою при реалізації яких є обмеження, що накладаються КС ОКЗ. Визначено умови для вибору типу алгоритму в залежності від характеру задачі, що розв'язується. Наведено приклади реалізації алгоритмів для конкретних задач булева і комбінаторного програмування.

Проведено огляд підходів до вибору часових шкал для проведення аналізу черг та дослідження можливості вибору часових шкал для побудови адекватних моделей сучасного трафіку. Використання таких моделей, зокрема, дозволяє вивчати динаміку черг активних мережевих пристроїв, що надзвичайно важливе для планування і розподілу завантаження КМ. Використання статистичних характеристик трафіку на невеликій кількості часових масштабів дозволяє розширити теоретичні концепції для критичних часових масштабів, що робить такий підхід застосовним до будь-якого трафікового процесу, включаючи трафік з довготривалою залежністю

Крім того, проведено аналіз моделей мережевого трафіку, який використовується при аналізі черг. Однак не був розглянутий випадок черг кінцевої довжини, у яких виникають відкидання пакетів. Отже, наведені результати є більш корисними для прогнозування затримок постановки пакетів до черги, ніж втрат пакетів.

Також у розділі обґрунтовано вибір узагальненого показника ефективності функціонування КМ ОКЗ. У якості базового критерію оцінки ефективності функціонування КС ОКЗ обрано забезпечення своєчасності

отримання інформації відповідно до заданої множини критичних значень M_{crit} , а базовим показником – узагальнений функціонал

$$L\left(T^{(\alpha)}, M_{crit}, PRIOR\right) = \sum_{\alpha=1}^{MT} \left(p^{(\alpha)} \cdot P\left(T^{(\alpha)} > T_{crit}^{(\alpha)}\right) \right), \quad (1)$$

де $T^{(\alpha)}$ – час обробки транзакції α ; $T_{crit}^{(\alpha)}$ – максимальне допустиме значення часу для обробки i -ої транзакції із множини можливих транзакцій ОКЗ M_{tranz} потужністю MT ; $p^{(\alpha)}$ – відносний пріоритет транзакції α , $P\left(T^{(\alpha)} > T_{crit}^{(\alpha)}\right)$ – ймовірність несвоєчасного отримання інформації транзакцією α .

Тоді цільова функцію мінімізації узагальненого функціонала є такою

$$L\left(T^{(\alpha)}, M_{crit}, PRIOR\right) \xrightarrow{Arch_{csys}, Arch_{cnet}} \min, \quad (2)$$

де $Arch_{csys}$ – поточна архітектура КС; $Arch_{cnet}$ – поточна архітектура КМ.

Таким чином, сформульовано у загальному вигляді оптимізаційну задачу мінімізації обраного критерію при наявності об'єктивних обмежень, що накладаються характеристиками мережі.

Третій розділ присвячено аспектам синтезу архітектур і моделювання еволюції КСіМ ОКЗ. Запропоновано підходи до синтезу архітектури КС ОКЗ, що враховують вибір задач управління компонентами, реалізації алгоритмів і методів розв'язання задач і розподіл задач по компонентах в процесі їх розв'язання. Сформульовано критерій якості і можливі відповідні обмеження. Окремо порушено питання синтезу архітектури КС ОКЗ, яке є одним з основоположних.

Запропоновано представлення моделі архітектури КС ОКЗ у вигляді орієнтованого графу

$$G_s = (V_D, R_F, \Theta), \quad (3)$$

де $V_D = \{v_d; d = \overline{1, d_0}\}$ – множина можливих варіантів організації даних; $R_F = \{r_f; f = \overline{1, f_0}\}$ – множина можливих варіантів реалізації функцій; $\Theta = (\theta_{df})$, $d = \overline{1, d_0}$; $f = \overline{1, f_0}$; $\dim \Theta = d_0 \times f_0$ – матриця, що відображує взаємозв'язок даних і функцій. При цьому $\theta_{df} = 1$, якщо для формування множини даних v_d використовується функція R_F та $\theta_{df} = 0$ інакше.

Задачу синтезу архітектури КС сформульовано таким чином

$$P_{i v \ell_{i v_i}} \left(x_{i v \ell_{i v_i}}, x_{i \ell_{i v_i}}, x_{i \ell_{i v_i} j}, x_{j w_j} \right) \rightarrow opt, \quad (4)$$

де P – показники якості, що оптимізуються; $x_{i v \ell_{i v_i}}$, $x_{i \ell_{i v_i}}$, $x_{i \ell_{i v_i} j}$ та $x_{j w_j}$ є булевими змінними, що приймають одиничні значення тільки в разі вибору відповідних етапів або варіантів; $i = \overline{1, I}$ – множина задач що мають множину варіантів розв'язання $v_i = \overline{1, V_i}$; $\ell_{i v_i} = \overline{1, L_{i v_i}}$ – множина етапів, які можуть

виконуватися множиною можливих варіантів $v_{\ell_{iv_i}} = \overline{1, V_{\ell_{iv_i}}}$ на множині доступних компонентів $j = \overline{1, J}$ системи, що має множину варіантів побудови $w_j = \overline{1, W_j}$. Таксономію введених нотацій представлено на рис. 1.

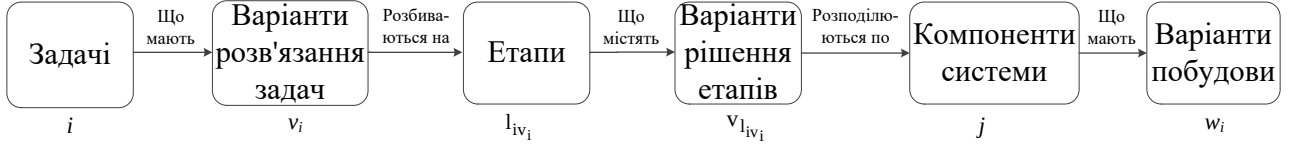


Рисунок 1 – Таксономічна схема взаємозв'язку утворюючих архітектури КС

Даний підхід дозволив провести стратифікацію завдання синтезу (рис. 2), що складається з цільової функції (4) та таких обмежень:

– на однозначність вибору з можливих варіантів розв'язання задач, тобто

$$\sum_{v_{\ell_{iv_i}}=1}^{V_{\ell_{iv_i}}} x_{iv_{\ell_{iv_i}}} = 1, \quad (5)$$

де $i = \overline{1, I}$ – множина задач;

– на відсутність дублювання етапів безпосереднього розв'язання задач, кожен з яких може бути реалізований тільки одним певним компонентом системи, тобто

$$\sum_{j=1}^J x_{\ell_{iv_i} j} = 1, \quad (6)$$

де $\ell_{iv_i} = \overline{1, L_{iv_i}}$ – допустима множина етапів розв'язання кожної із задач;

– на максимальну кількість задач M , яке допустимо реалізацією системи, тобто

$$\sum_{i=1}^I \sum_{v_{\ell_{iv_i}}=1}^{V_{\ell_{iv_i}}} x_{iv_{\ell_{iv_i}}} \leq M; \quad (7)$$

– на мінімальну кількість компонентів, тобто

$$\sum_{j=1}^J \sum_{w_j=1}^{W_j} x_{jw_j} \geq \overline{M}. \quad (8)$$

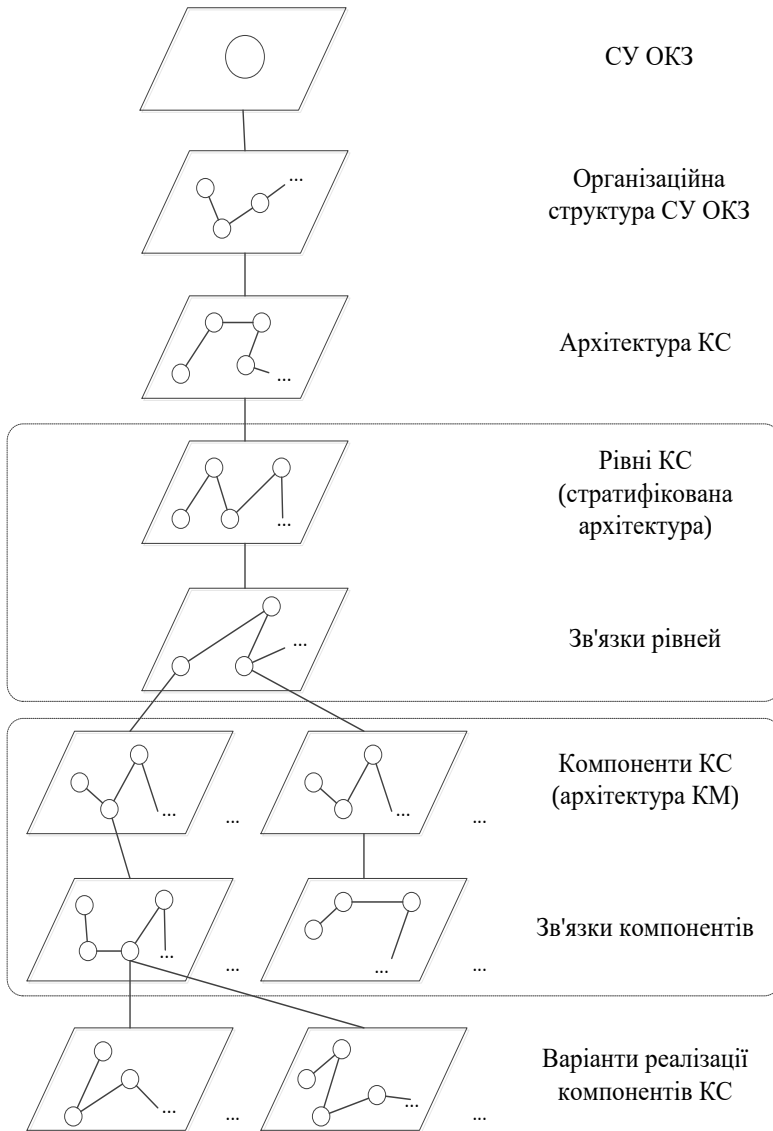


Рисунок 2 – Ієрархічна схема етапів синтезу архітектури КС

Також враховуються обмеження на максимально допустимі кількості етапів однієї задачі (n_{ij}), що розв'язується в будь-якому з компонентів системи, різних задач (n_j), що розв'язуються будь-яким з компонентів системи, та безпосередньо

на допустимість компонент відповідно

$$\sum_{\ell_{iv_i}=1}^{L_{iv_i}} x_{i\ell_{iv_i}j} \leq n_{ij}; \quad \sum_{i=1}^I \sum_{\ell_{iv_i}=1}^{L_{iv_i}} x_{i\ell_{iv_i}j} \leq n_j; \quad \sum_{j=1}^J x_{i\ell_{iv_i}j} = 1. \quad (9)$$

Отже, стає можливим завдання умови типу логічного «І» між деякими компонентами j , що реалізують певні задачі або етапи $j \in N_{jw_j} \left(N_{iv_{\ell_{iv_i}}}, N_{i\ell_{iv_i}j} \right)$, і пов'язаною з ними множиною компонентів, задач або етапів: якщо $x_{iw_j} = 1$, то $x_{i'w'_j} = 1$ для усіх $j'w'_j \in N_{jw_j}$, тобто

$$\left(\prod_{j'w'_j \in N_{jw_j}} x_{j'w'_j} - 1 \right) x_{jw_j} = 0 \quad \Rightarrow \quad \left(\sum_{j'w'_j \in M_{jw_j}} x_{j'w'_j} - 1 \right) x_{jw_j} = 0. \quad (10)$$

Обмеження на недопущення розв'язання в безпосередньо не пов'язаних компонентах взаємопов'язаних етапів ℓ_{iv_i} та ℓ'_{iv_i} однієї задачі є таким

$$\sum_{i, \ell_{iv_i}, j} \theta_{jj'} x_{i\ell_{iv_i}j} x_{i'\ell'_{iv_i}j'} = 1, \quad (11)$$

де $\theta_{jj'} = 1$ при наявності безпосереднього зв'язку між компонентами j та j' КС.

Таким чином, запропоновано метод синтезу архітектури КС ОКЗ, що враховує вибір задач компонентами КС, реалізації алгоритмів і методів розв'язання задач і розподіл задач по компонентах в процесі їх розв'язання.

На основі синтезованої та стратифікованої архітектури КС ОКЗ запропоновано двохетапний метод синтезу архітектури КМ ОКЗ: синтез найменшої можливої сукупності компонентів, їх розташування, кількості і характеру взаємозв'язків між компонентами, та синтез прийнятних варіантів реалізації кожного з компонентів і взаємозв'язків. У процесі синтезу враховуються вимоги за доступністю компонент КМ та процес функціонування в контексті навколишнього середовища за умови можливих впливів.

На першому етапі задається такий взаємозв'язок між введеними змінними, враховуючи що n_ℓ – сукупність компонент, які можна застосувати для розв'язання задачі відповідного типу в ℓ -й області КС

$$\sum_{j \in n_\ell} x_j \geq y_\ell \geq \frac{1}{|n_\ell|} \sum_{j \in n_\ell} x_j, \quad (12)$$

де $j = \overline{1, J}$ – сукупність компонентів КС; $\ell = \overline{1, L}$ – фізичні області КС; булеві змінні x_j та y_ℓ приймають ненульові значення при таких умовах: $x_j = 1$, якщо використовується компонент j , $y_\ell = 1$, якщо використовується область ℓ .

Основна задача, котра підлягає розв'язанню на другому етапі, полягає в мінімізації витрат на побудову компонентів, яка описується як

$$C = \sum_{\alpha} \sum_k c_{\alpha k} \theta_{\alpha k} + \sum_{\beta} \sum_k c_{\beta k} \theta_{\beta k} \rightarrow \min \quad (13)$$

при обмеженнях, що описуються таким чином:

$$P_{i0}(\theta_{ik}, \theta_{0k}) \left[\begin{aligned} &P_{Rk}(\theta_{Rk}, \theta_{iRk}) (1 - P_{ijk}(\theta_{ijk}, \theta_{Rjk}, \theta_{jk})) + \\ &+ (1 - P_{Rk}(\theta_{Rk}, \theta_{iRk})) (1 - P_{ij}(\theta_{ijk}, \theta_{jk})) \end{aligned} \right] \geq P_i^*; \quad (14)$$

$$\sum_k \theta_{\alpha k} = 1, \alpha = i, j, R; \quad \sum_k \theta_{\beta k} = 1, \beta = \{iR, ij, jR, j0\},$$

$$\text{де } P_{Rk}(\theta_{Rk}, \theta_{iRk}) = \left(\sum_k P_{Rk} \theta_{Rk} \right) \left(\sum_k P_{iRk} \theta_{iRk} \right); \quad P_{ik}(\theta_{ik}, \theta_{0k}) = \left(\sum_k P_{ik} \theta_{ik} \right) \left(\sum_k P_{0k} \theta_{0k} \right),$$

$$P_{ijk}(\theta_{ijk}, \theta_{Rjk}, \theta_{jk}) = \prod_j \left[1 - \left(1 - \sum_k P_{ijk} \theta_{ijk} \right) \left(1 - \sum_k P_{Rjk} \theta_{Rjk} \right) \left(\sum_k P_{jk} \theta_{jk} \right) \right],$$

$$P_{ij}(\theta_{ijk}, \theta_{jk}) = \prod_j \left[1 - \left(\sum_k P_{ijk} \theta_{ijk} \right) \left(\sum_k P_{jk} \theta_{jk} \right) \right].$$

При цьому $P_{ik}(k = \overline{1, K_i})$ – ймовірність безвідмовного функціонування частини КС, що реалізує розв’язання k -го варіанту i -ої задачі; $P_{jk}(k = \overline{1, K_j})$ – ймовірність безвідмовного функціонування k -го варіанту реалізації j -го компонента КС; $P_{Rk}(k = \overline{1, K_r})$ – ймовірність безвідмовного функціонування k -го варіанту реалізації R -го мережевого компонента; P_{dk} – ймовірність безвідмовного функціонування складеного каналу зв’язку, що має k -й варіант реалізації, і утворює певний маршрут (d) з’єднання при розв’язанні задачі управління; $c_{ik}, c_{jk}, c_{Rk}, c_{dk}$ – витрати на фізичну і логічну реалізацію відповідних компонентів, включаючи вузли обробки і передачі інформації, а також канали зв’язку (що утворюють складовий канал зв’язку маршруту з’єднання для розв’язання задачі); булеві змінні, що приймають одиничні значення тільки в разі вибору k -х варіантів побудови: θ_{ik} – i -ої задачі, θ_{jk} – j -го компонента КС, θ_{Rk} – R -го проміжного вузла КМ, $\theta_{\ell dk}$ – каналів зв’язку на маршруті з’єднання для розв’язання задачі.

Отже, запропоновано метод синтезу архітектури КМ ОКЗ, який разом із методом синтезу архітектури КС ОКЗ складають комплекс методів синтезу архітектур КСіМ ОКЗ.

У розділі також запропоновано подальший розвиток математичної моделі, що дозволяє розв’язати задачу оптимізації розподілу задач управління по компонентах розподіленої КС ОКЗ в процесі її синтезу. Особливість такої моделі – розбиття глобальної оптимізаційної задачі на окремі підзадачі. Крім того, виділено і формалізовано можливі розподіли для допустимих множин задач, що розв’язуються, і доступних компонентів КС, що синтезується. Для вибору оптимального рішення для таких розподілів проведено врахування основних характеристик КС, відповідних обмежень і можливих логічних взаємозв’язків.

Рішення оптимізаційної задачі включає такі етапи:

– знаходження оптимального розподілу взаємопов'язаних множин засобів, необхідних для реалізації певної функціональності, по архітектурі і конкретних компонентах КС ОКЗ;

– вибір складу компонентів.

Для першого задачі етапу позначимо Π_{im} – шлях альтернативного графа варіантів побудови m -го ($m = \overline{1, M}$) маршруту з'єднання для розв'язання задачі i -го типу ($i = \overline{1, I}$); значення цільової функції F_0 будуть визначатися обраною сукупністю можливих варіантів побудови окремих маршрутів. Тоді оптимальний розподіл взаємопов'язаних множин засобів, необхідних для реалізації певної функціональності, за компонентами КС ОКЗ визначається як

$$\mathfrak{R}_{техн}^{(onm)} = \underset{\Pi_i}{extr} F_0(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM}). \quad (15)$$

На другому задачі етапі введемо $\theta_{nv_iu}^{im}$ – булеву змінну, яка приймає значення «1» в разі, коли маршрут розв'язання n варіанту v_i етапу ℓ_{iv_i} задачі i реалізується на логічному рівні u архітектури КС ($u = \overline{1, u_0}$); $y_{\Lambda ju}$ – додатна цілочисельна змінна, яка характеризує кількість засобів типу Λ ($\Lambda = \overline{1, L}$), однозначно визначається сукупністю індексів $\{i, \ell_{iv_i}, m, v_i, u\}$, що реалізують розв'язання задач, необхідних для реалізації в компоненті j КС ($j = \overline{1, J}$) на логічному рівні u КС; λ^{im} – частота використання маршруту m для розв'язання задачі i ; $\tau_{\ell_{iv_i} v_i u}^{im}$ – час розв'язання варіанту v_i етапу ℓ_{iv_i} задачі i маршрутом розв'язання m ; $\rho_{\Lambda u}$ – допустимий коефіцієнт завантаження засобів типу Λ на логічному рівні u архітектури КС. Тоді множина можливих варіантів вибору складу компонентів КС

$$M_{\mathfrak{R}} = \left\{ \mathfrak{R}_{комп}(\mathfrak{R}_{техн}^{(onm)}) \mid \sum_{i, m, n, u} \lambda^{im} \tau_{\ell_{iv_i} v_i u}^{im} \theta_{nv_iu}^{im} \leq \rho_{\Lambda u} y_{\Lambda ju} \right\}. \quad (16)$$

Тепер задача полягає у визначенні характеристик і виділенні можливих варіантів встановлення маршрутів, потрібних для розв'язання задачі. Нехай, c_{mi}^{μ} – експлуатаційні витрати компонента КС; R_{mi}^{μ} – надійність компонента КС; E_{mi}^{μ} – енергоспоживання компонента КС; $\rho_{\Lambda mij}^{\mu}$ – коефіцієнт завантаження засобів типу Λ , що відносяться до компоненту j КС при варіанті μ встановлення маршруту. Стає можливим переформулювання оптимізаційної задачі, з урахуванням витрат на створення та експлуатацію компонентів КС, як

$$\mathfrak{R}_{техн}^{(onm)} = \left\{ \bar{\Pi}_0 \mid Z_{\min} = \min \left(\sum_{\Lambda, j, u} c_{\Lambda} y_{\Lambda ju} + \sum_{m, i, \mu} c_{mi}^{\mu} \theta_{mi}^{\mu} \right) \right\}, \quad (17)$$

де обмеження за коефіцієнтом завантаження компонентів є таким

$$\sum_{mi} \left(\sum_{\mu=1}^{\mu_0} \rho_{mi\Lambda u}^{\mu} \theta_{mi}^{\mu} \right) \leq y_{\Lambda ju} \rho_{\Lambda}. \quad (18)$$

Далі в розділі проаналізовано проблему, що виникає при побудові моделей топологічних структур, які враховують динаміку розвитку конкретних компонент КМ ОКЗ, та запропоновано математичну модель, що дозволяє проаналізувати процес еволюції топологічної структури КМ протягом фіксованого часового інтервалу. Процес еволюції комп'ютерної мережі розглядається на часовому інтервалі $[0, T]$, розбитому на M часових ділянок можливого розвитку топології, тобто

$$[0, T] = \bigcup_{m=1}^M [\tau_{m-1}, \tau_m], \quad \tau_0 = 0, \quad \tau_M = T. \quad (19)$$

Нехай $z_{i_j m}$ – витрати на розвиток вузла введення i_j ($i_j = \overline{1, I_j}$) в період m ; $z_{v_j m}$ – витрати на розвиток вузла обробки v_j ($v_j = \overline{1, V_j}$) в період m ; P_{jm} – резерв обчислювального ресурсу компонента j для обробки інформації на початок періоду m ; $P_{i_j m}$ – розмір обчислювального ресурсу, необхідного для обробки додаткової інформації, отриманої в результаті розвитку вузла i_j в m -й період; ℓ , ($\ell = \overline{1, L}$) – один з можливих варіантів розвитку вузлів обробки; $P_{v_j m}(\ell)$ – збільшення обчислювального ресурсу вузла v_j в період m при варіанті розвитку ℓ . Тоді загальний рівень витрат на розвиток компонента j дорівнює

$$Z_j = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{i_j=1}^{I_j} z_{i_j m} \cdot x_{i_j m} + \sum_{v_j=1}^{V_j} z_{v_j m} \cdot y_{i_j m} \right). \quad (20)$$

Для визначення варіанту розвитку вузлів обробки скористаємося нерівністю, виконання якої забезпечує можливість обробки додаткового навантаження (H – функція Хевісайда)

$$P_j^{(0)} = \sum_{v_j=1}^{V_j} P_{v_j m}(\ell) \geq H \left(\sum_{i_j=1}^{I_j} P_{i_j m} - P_{jm} \right) \forall m. \quad (21)$$

Цільова функція задачі оптимізації, якщо в якості критерію розглянути варіант оптимального використання виділених коштів, має такий вигляд

$$P_j^{(0)} \rightarrow \max. \quad (22)$$

Найбільший вплив на еволюцію топології комп'ютерної мережі має динаміка еволюції зв'язків і характеристики інформації, що передається за їх допомогою. Обмеження на інтенсивність інформаційного потоку між двома компонентами в кожен з періодів планування еволюції мають такий вигляд

$$\sum_{\xi=1}^{L(jj)} \sum_{m=1}^{t-M} s_{jj'}^{\xi} z_{(jj')m}^{\xi} \geq x_{(jj')m} + x_{(jj')m}, \quad (jj') \in \theta. \quad (23)$$

Введемо такі змінні: R_m – сумарний ресурс, виділений для проміжних компонентів в період планування m ; $R_{(jj')\eta}^\xi$ – витрати ресурсу на реалізацію ділянки мережі типу ξ між парою компонентів (jj') в період η ; $M_{(jj')}^\xi$ – тривалість реалізації транспортного компонента типу ξ між парою компонентів (jj') . Тепер можна записати умову обмеженого споживання ресурсу в період планування m

$$\sum_{(jj') \in \theta} \sum_{\xi=1}^{L(jj')} \sum_{\eta=1}^{L_{(jj')\eta}^\xi} R_{(jj')\eta}^\xi z_{(jj')m-\eta+1}^\xi \leq R_m, \quad L_{(jj')m}^\xi = \min \left\{ M_{(jj')}^\xi, m \right\}. \quad (24)$$

Таким чином, запропоновано модель еволюції топологічної структури КМ ОКЗ, що враховує динаміку розвитку конкретних компонент мережі в залежності від їх типу і призначення. Крім того, запропоновано можливі рішення, які стосуються планування еволюції КМ (на рівні архітектури) ОКЗ. Для цього пропонується вирішення двох пов'язаних задач: оптимального планування розвитку компонент і оптимального планування розвитку мережі, при цьому відповідна цільова функція є такою

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \left(\sum_{i_j=1}^I K_{i_jmj} + \sum_{v_j=1}^V K_{v_jmj} \right) + \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{(jj') \in \theta} \left(Q_{(jj')m} x_{(jj')m} + \sum_{\xi=1}^{L(jj')} K_{(jj')m}^\xi z_{(jj')m}^\xi \right) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (25)$$

де $Q_{(jj')m}$ – питомі експлуатаційні витрати в період планування m ; $K_{(jj')m}^\xi$ – капітальні витрати на реалізацію проміжного компонента типу ξ між компонентами j і j' ; K_{imj} – капітальні витрати на реалізацію вузла i комплексного компонента j ; K_{vmj} – капітальні витрати на реалізацію вузла v комплексного компонента j . При цьому слід враховувати такі обмеження: балансне співвідношення $\sum_{(jj') \in \theta'_j} x_{(jj')m} - \sum_{(jj') \in \theta''_j} x_{(jj')m} = Q_{jm}$, інтенсивність

інформаційного потоку $\sum_{\xi=1}^{L(jj')} \sum_{m=1}^{t-M_{jj'}^\xi} s_{(jj')}^\xi z_{(jj')m}^\xi \geq x_{(jj')m} + x_{(j'j)m}, (jj') \in \theta$ та

обмежене споживання ресурсу $\sum_{(jj') \in \theta} \sum_{\xi=1}^{L(jj')} \sum_{\eta=1}^{L_{(jj')\eta}^\xi} R_{(jj')\eta}^\xi z_{(jj')m-\eta+1}^\xi \leq R_m,$

$L_{(jj')m}^\xi = \min \left\{ M_{(jj')}^\xi, m \right\}$, де R_m – сумарний ресурс, виділений для проміжних компонентів в період планування m ; $R_{(jj')\eta}^\xi$ – витрати ресурсу на реалізацію ділянки мережі типу ξ між парою компонентів (jj') в період η ; $M_{(jj')}^\xi$ – тривалість реалізації транспортного компонента типу ξ між парою компонентів (jj') . Таким чином, запропоновано підходи до формалізації задач, пов'язаних з

побудовою моделей еволюції архітектур, і запропоновано модель еволюції архітектури КМ ОКЗ.

Запропоновані модель еволюції топологічної структури КМ ОКЗ і модель еволюції архітектури КМ ОКЗ складають комплекс моделей еволюції КМ ОКЗ.

Окрім цього, проведено дослідження деяких мультифрактальних спектрів (спектр Хаусдорфа, укрупнений мультифрактальний спектр, спектр Лежандра), які можуть бути у подальшому використані при дрібномасштабному аналізі процесу та визначено способи їх застосування для моделювання трафіку КМ ОКЗ з урахуванням наявності довгострокової залежності трафікового процесу. Запропоновано метод розподілу моментів при дрібномасштабній шкалі, показано можливість застосування мультифрактальних спектрів при фрактальному вейвлет-моделюванні і моделюванні довготривалої залежності.

Четвертий розділ присвячено методам реконфігурації бездротових компонент КМ ОКЗ. Виявлено найбільш значущі фактори, що впливають на пропускну здатність бездротових мереж, а також проведено їх аналіз. Їх вплив на пропускну здатність можна знизити за допомогою впровадження механізмів, що дозволяють розпізнати тип помилки (подія «хендовер», перевантаження, помилка передачі або каналу), що дасть можливість використання відповідного даному типу помилки більш ефективного механізму відновлення. Виявлено, що пропускну здатність бездротових і мобільних мереж в значній мірі залежить від методів і алгоритмів передачі інформації, що реалізуються протоколами транспортного рівня. Підвищення ефективності транспортного рівня стека протоколів TCP/IP можливо за рахунок використання інформації інших рівнів стека протоколів, зокрема, службової інформації, що міститься в пакеті, що надається рівнем передачі інформації і фізичним рівнем, а також врахуванням фрактальності трафіку. Виконано дослідження особливостей передачі даних в бездротових компонентах КМ ОКЗ. Показано, що на ефективність передачі інформації істотний вплив мають затримки і помилки каналного рівня, характер яких змінюється і погано піддається прогнозуванню. Також виявлено найвпливовіші чинники втрат пакетів та розроблено сценарій моделювання, що дозволяє наочно показати вплив внесених змін на роботу протоколу TCP.

Запропоновано модифікації та наведено результати імітаційного моделювання протоколів бездротових компонент КМ. Показано, що застосування запропонованих модифікацій дозволяє досягти збільшення пропускну здатності протоколу TCP в бездротових компонентах за рахунок скорочення часу, необхідного для відновлення розміру ковзаючого вікна після втрати пакету, а також зменшення часу передачі пакету у встановленому з'єднанні. Крім того, збільшується час перебування протоколу в фазі повільного старту, що призводить до більш швидкого збільшення розміру ковзаючого вікна, ніж у стандартної версії протоколу.

Запропоновано метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку бездротових компонент КМ ОКЗ на основі аналізу показника Херста, який може бути реалізований на транспортному рівні. Для цього запропоновано метод оцінки значення показника Херста на основі дискретного вейвлет-перетворення, який не вимагає великого обсягу обчислень і дозволяє

виконувати аналіз в реальному масштабі часу. Розкладання трафіку проводиться за ортогональним базисом, який утворений зсувами і кратномасштабними копіями вейвлет-функції. Дискретні вейвлети використовуються, як правило, в парі з пов'язаними з ними дискретними скейлінг-функціями $\varphi_{J,k}(t)$, які мають з вейвлетами загальну область завдання і певне співвідношення між значеннями (формою). Відповідно до дискретного вейвлет-перетворення, часовий ряд $X(t)$ складається з набору коефіцієнтів – деталізуючих і низкорівневих апроксимуючих

$$X(t) = approx_J(t) + \sum_{j=1}^J det\,ail_j(t) = \sum_k a_{J,k} \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t). \quad (26)$$

При заданих материнському вейвлеті ψ і відповідній скейлінг-функції φ , апроксимуючі коефіцієнти $a_{j,k}$ і деталізуючі коефіцієнти $d_{j,k}$ ДВП для процесу $X(t)$ визначаються таким чином

$$a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \varphi_{j,k}(t) dt, \quad d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi_{j,k}(t) dt, \quad (27)$$

де $\varphi_{j,k} = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k)$; $\psi_{j,k} = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k)$. Основу методу оцінювання

показника Херста становить положення про те, що зміна середніх значень

квадратів модулів вейвлет-коефіцієнтів $\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_x(j,k)|^2$ підпорядковується

скейлінговому відношенню $\mu_j \sim 2^{(2H-1)j}$, де H – показник Херста; $d_x(j, k)$ – деталізуючі вейвлет-коефіцієнти на заданому рівні розкладання j . Дане співвідношення дозволяє оцінити показник Херста

$$\log_2(\mu_j) = \log_2 \left(\frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_x(j,k)|^2 \right) \approx (2H - 1)j + const. \quad (28)$$

Метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку в бездротовій компоненті КМ ОКЗ оснований на запропонованій моделі та передбачає зміну інтенсивності трафіку за рахунок зміни розміру ковзаючого вікна на основі моніторингу потоків даних на заданому інтервалі часу на вході ділянки бездротової компоненти з подальшим аналізом їх статистичних характеристик та класифікацій кожного з них. Запропонований метод може бути використаний на транспортному рівні систем управління потоками даних бездротових компонент КМ ОКЗ.

Запропоновано метод перерозподілу навантаження базової станції бездротових компонент КМ ОКЗ, що дозволяє рухомим вузлам з рівним або близьким співвідношенням сигнал-шум перемикатися на менш завантажену базову станцію.

Такий метод дозволяє базовій станції ініціювати процес події «хендовер», що дозволяє більш рівномірно розподіляти навантаження від рухомих вузлів між сусідніми базовими станціями.

Процес хендоверу включає в себе 3 етапи: виявлення, коригування та реєстрацію. Етап виявлення починається в момент входження рухомого вузла в нову зону. Після цього він отримує повідомлення від найближчої точки доступу такої зони. Етап коригування починається в момент отримання рухомим вузлом повідомлення від нової точки доступу і триває до моменту закінчення настройки мережевого інтерфейсу відповідно до отриманої нової IP адреси. Етап реєстрації полягає в підтвердженні рухомим вузлом отриманої IP адреси.

Якщо за допомогою T_d позначити тривалість етапу виявлення, T_c – етапу коригування, і T_r – етапу реєстрації, то загальна тривалість «хендоверу» T_h може бути обчислена відповідно до наступного виразу

$$T_h = T_d + T_c + T_r. \quad (29)$$

Процес ініціюється при зниженні доступної величини пропускної здатності базової станції нижче певного порогу.

У запропонованій модифікації методу, в базові станції додається функція, яка оцінює значення пропускної здатності вихідного каналу, а також додано порогове значення використання його пропускної здатності, рівне 75% від максимальної пропускної здатності. Таким чином, коли значення поточної пропускної здатності досягає порогового, базова станція починає розсилати повідомлення всім рухомим вузлам і перевіряє наявність більш вільних сусідніх зон для перемикавання рухомих вузлів. При наявності сусідніх зон з меншим завантаженням, базова станція повідомляє всіх потенційних кандидатів про необхідність їх перемикавання.

При виконанні оцінки можливості запуску «хендоверу» для конкретного вузла, використовуються такі умови:

– різниця співвідношення сигнал-шум (ΔS) в зоні обслуговування базової станції повинна бути не більше 5 ДБ ($\Delta S \leq 5$):

$$\Delta S = S_n - S_{n-1}; \quad S_n = \frac{P_{s_n}}{P_{n_n}}; \quad S_{n-1} = \frac{P_{s_{n-1}}}{P_{n_{n-1}}}, \quad (30)$$

де S_n – відношення сигнал-шум для зони, в яку переходить рухомий вузол, S_{n-1} – відношення сигнал-шум в поточній зоні, P_s – середня потужність сигналу, P_n – середня потужність шуму;

– зона, в яку переходить рухомий вузол, повинна мати не менше 25% вільної пропускної здатності вихідного каналу.

Отже, є можливість оптимізації роботи мережі за критерієм сумарної пропускної здатності базових станцій.

Також запропоновано метод управління маршрутами передачі інформації для зменшення часу передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ за рахунок раціональної маршрутизації службової інформації, який дозволяє зменшити час передачі інформації при дотриманні введених обмежень в порівнянні з методом, використовуваним в протоколі EIGRP.

Розроблений метод є адаптивним, оскільки дозволяє регулювати частоту поширення службової інформації маршрутизатором залежно від величини середнього інтервалу між виникненням відмов, розрахованим на основі статистичних даних. Метод складається з наступних етапів:

1. Складається статистична таблиця, в яку заносяться моменти виникнення відмов. Час першої посилки повідомлення HELLO про перевірку стану мережі, $t_{отк_1}$, обчислюється таким чином

$$t_{отк_1} = \begin{cases} t_{отк_{ср}}^{npc}, & t_{отк_{ср}}^{npc} < t_{отк_1}^{mc}; \\ t_{отк_1}^{mc}, & t_{отк_{ср}}^{npc} \geq t_{отк_1}^{mc}, \end{cases} \quad (31)$$

де $t_{отк_i}$ – моменти часу виникнення відмов, $i = \overline{1, n_{отк}}$; $t_{отк_{ср}}^{npc}$ – середній інтервал часу між виникненням відмов за попередню добу; $t_{отк_1}^{mc}$ – момент часу виникнення першої відмови за поточну добу.

2. На підставі накопичених статистичних даних про виникнення відмов, обчислюється середній інтервал часу між виникненням відмов.

3. Проводиться перевірка умови: якщо обчислений середній інтервал часу між виникненням відмов перевищує період, встановлений протоколом EIGRP для поширення оновлюючого повідомлення про стан каналів зв'язку, рівний 30 хв, то в момент настання відмови поширюється не повідомлення про відмову, а оновлююче повідомлення про стан каналів зв'язку (КЗ):

- поширюється l_{oc} , якщо $t_{отк_i} + t_{отк_{ср}} > t_{отк_i} + T_{oc}$;
- поширюється l_{co} , якщо $t_{отк_i} + t_{отк_{ср}} \leq t_{отк_i} + T_{oc}$.

Якщо середній інтервал часу між виникненням відмов закінчився, а відмови не відбулося, повідомлення про стан каналів зв'язку все одно поширюється, а також вносяться зміни в базу даних, тобто якщо $t_{отк_{ср}} > T_{oc}$, то

$$t_{распр} = \begin{cases} t_{отк_{i-1}} + t_{отк_{ср}}, & t_{отк_{i-1}} + t_{отк_{ср}} < t_{отк_i}; \\ t_{отк_i}, & t_{отк_{i-1}} + t_{отк_{ср}} \geq t_{отк_i}, \end{cases} \quad (32)$$

де $t_{распр}$ – момент часу поширення оновлюючого повідомлення про стан КЗ.

4. Розраховується частота поширення повідомлень HELLO, використовуючи середній інтервал часу між виникненням відмов.

Слід окремо наголосити, що чим більше період накопичення статистичних даних, тим точніше буде розрахований середній інтервал між виникненням відмов і ефективніше буде функціонувати даний метод і, відповідно, зменшуватися час передачі даних.

Наприкінці розділу запропоновано метод перерозподілу пропускну здатності для зменшення часу передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ, який використовує розширену декомпозиційну модель фрактального трафіку і дозволяє враховувати властивості фрактальності інформаційного трафіку і особливості безпроводних мереж. Тим самим забезпечується

оптимальне використання виділеної пропускної здатності, що призводить до зменшення ймовірності перевантажень і прискорення передачі інформації.

Для можливості врахування події «хендовер» декомпозиційною моделлю фрактального трафіку, припустимо, що на часовому інтервалі $[0, T]$ j -й вузол L раз виходив із зони обслуговування, при цьому ℓ -й інтервал події «хендовер» ($\ell = \overline{1, L}$) задамо як $h_{j,\ell} = \left(t_{j,\ell}^{(h)}, t_{j,\ell}^{(h)} + \Delta t_{j,\ell}^{(h)} \right)$. Це дозволяє визначити функцію часового зсуву в декомпозиційній моделі і врахувати вплив події «хендовер»

$$h_j(t) = t + \sum_{t_{j,\ell}^{(h)} < t} \Delta t_{j,\ell}^{(h)}, \quad t \in [0, T], \quad \ell \in [0, L], \quad t_{j,0}^{(h)} = T; \quad \Delta t_{j,0}^{(h)} = 0. \quad (33)$$

З урахуванням функції (33), можливо врахувати особливості бездротових компонент та запропонувати метод перерозподілу пропускної здатності в бездротових компонентах КМ ОКЗ у вигляді такої послідовності етапів.

Етап 1. На основі моніторингу потоків на вході ділянки проводиться отримання їх статистичних характеристик.

Етап 2. Для отриманих статистичних характеристик здійснюється розрахунок показника Херста.

Етап 3. На основі кожного розрахованого показника Херста за критерієм його значення виконується класифікація відповідних потоків.

Етап 4. Якщо значення показника Херста для потоку лежить в межах $0,75 < H < 1$, то виконується прогнозування передбачуваного обсягу трафіку.

Етап 5. Відповідно до результатів прогнозування, виконується пропорційний (етап 6) або пріоритетний (з ваговими коефіцієнтами, етап 7) перерозподіл доступної пропускної здатності такої ділянки.

Етап 6. Якщо прогнозований обсягу трафіку не перевищує значення сумарної пропускної здатності ділянки, то проводиться її пропорційний розподіл відповідно до затребуваних значень.

Етап 7. Якщо прогнозований обсягу трафіку перевищує значення сумарної пропускної здатності ділянки, то, відповідно до процедури повідомлення про перевантаження, певні джерела (що обрані у відповідності до існуючих пріоритетів) отримують команду на зниження швидкості передачі у відповідності до правил протоколу транспортного рівня, що використовується.

Відзначимо, що при відсутності події «хендовер» ($L = 0$), зсуву по часовій осі не відбувається, тобто $h_j(t) = t$.

П'ятий розділ присвячено розробці моделей та методів підтримки реконфігурації архітектур КМ ОКЗ. Так, удосконалено математичну модель функціонування хмарної компоненти КМ ОКЗ. Серед найбільш важливих характеристик КМ обрано середню затримку пакетів між виділеною парою, що використовує свій, тимчасово створений, віртуальний канал. Для спрощення удосконаленої моделі уведено ряд припущень. У рамках розробленої моделі сформульовано задачу мінімізації середнього часу затримки при обмеженнях на сумарну вартість каналів. Для її розв'язання використано правило множників Лагранжа. Вирази, що отримано в результаті розв'язання оптимізаційної задачі, дозволяють провести аналіз відповідних характеристик хмарної компоненти

КМ ОКЗ і можуть бути використані як при синтезі топологічної структури мережі, так і при проектуванні її поширень.

Якщо k – номер віртуального каналу (ВК) між вузлом-джерелом i_0 та вузлом-адресатом j_0 ($k = 1, \bar{K}$), то процес доставки до нього пакетів (назвемо їх пакетами класу k) будемо вважати пуасонівським з параметром $\lambda_k^{(B)}$, причому реальний маршрут пакету даного класу визначимо булевою матрицею $\|a_{ij}^{(k)}\|_{N \times N}$, де $a_{ij}(k) = 1$ тоді і тільки тоді, коли маршрут (i, j) входить до віртуального каналу k .

Процес обслуговування пакетів в хмарній компоненті КМ ОКЗ визначимо матрицею $\|P_{k_1 k_2}\|_{K \times K}$, де $P_{k_1 k_2}$ – ймовірність того, що пакет k_1 -го класу після обслуговування ВК з номером k_1 поступить до ВК з номером k_2 .

Функція розподілу тривалості обслуговування пакетів k -го класу в n -му вузлі буде експоненційною з параметром $\mu_{nk} = b_n \ell_k$, де b_n – пропускна здатність n -го каналу, а $1/\ell_k$ – середня довжина пакету k -го класу.

Середню затримку пакету можна розрахувати таким чином

$$t^{(3)} = \frac{1}{\lambda^{(B)}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{\lambda_n}{1 \cdot b_n - \lambda_n}, \quad (34)$$

а середню затримку пакетів в каналі як

$$t_{nk}^{(3)} = \frac{1}{\ell \cdot b_n (1 - \psi_n)}. \quad (35)$$

Тоді задача вибору пропускних здатностей зводиться до знаходження вектору

$$\vec{b} = (b_1, b_2, \dots, b_N), \quad (36)$$

що мінімізує середній час затримки при обмеженнях на сумарну вартість каналів

$$T_3 \rightarrow \min; \quad (37)$$

при

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n b_n = D_\Sigma. \quad (38)$$

Вирази, що отримано в результаті розв'язання оптимізаційної задачі, дозволяють провести аналіз відповідних характеристик хмарної компоненти КМ ОКЗ і можуть бути використані як при синтезі топологічної структури КМ, так і при проектуванні її поширень.

Також проведено дослідження різних підходів до вибору часових шкал, що використовуються при вивченні організації черг КМ ОКЗ. Доведено, що експоненційні часові шкали є оптимальними для фрактального трафіку в сенсі узгодження необхідної точності і обчислювальної потужності, необхідної для обчислення апроксимації максимуму. Удосконалено метод побудови оптимальних часових шкал для апроксимації довжини черг КМ ОКЗ, який відрізняється від відомих використанням результатів короткострокового прогнозу поведінки трафіку, що дозволяє отримати прогнозовані значення довжин черг при реконфігурації мережі.

На першому етапі представимо шкалу Θ_i (рис. 3) як множину часів відліку, впорядкованих за зростанням $\theta_i = \{\tau_k^{\theta_i}\}$.

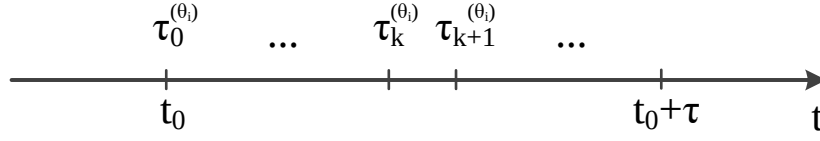


Рисунок 3 – Множина часів відліку, впорядкованих по зростанню

Для фрактального трафіку метрика точності $M^{[\theta]}(b)$ визначається як

$$h_{\theta}\left(T_k^{[\theta]}\right)=\varsigma\left(s_k^{[\theta]}, H\right), \quad (39)$$

де H – показник Херста; ς – функція оцінки ступеню фрактальності.

На другому етапі доведено, що у множини Θ існує підмножина метрик з властивостями: є метрика точності нижче заданого порогу α ; потужність такої метрики – найменша серед допустимих. Це набір $\theta_{\alpha, v} = \{v\alpha^k : k \in \mathbb{Z}\}$ експоненційних часових шкал, де v – параметр, що залежить від порогу.

На третьому етапі, нехай, $C(b)$ – граничне допустиме значення точності прогнозу; $M^{[\theta]}(b)$ – максимальна помилка експоненційної шкали α (рис. 4).

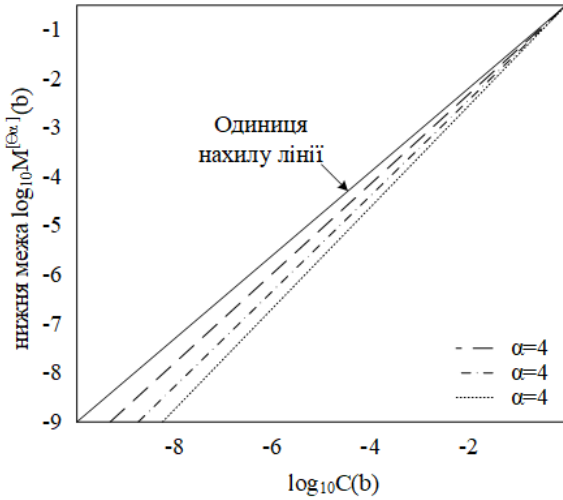


Рисунок 4 – Залежність відношення значень $M^{[\theta]}(b)$ від $C(b)$

Показано, що різниця їх значень знаходиться в допустимих межах.

Проведено дослідження необхідної точності і обчислювальної потужності, що вимагається для обчислення апроксимації максимуму, і встановлено, що експоненційні часові шкали є оптимальними для фрактального трафіку в сенсі узгодження. Експерименти показали вплив хвостів розподілів в різних масштабах часу на процес організації черг. Спостерігається, що при негаусовських трафікових сценаріях кореляційна структура описує поведінку черг недостатньо адекватно.

Таким чином, удосконалено метод багатоскальового моделювання, який використовується при моделюванні мультифрактального трафіку з довготривалою залежністю. Використовуючи вейвлет-перетворення Хаара, спеціальну мультиплікативну структуру вейвлета і коефіцієнти масштабування для гарантування позитивних результатів, модель надає швидкий $O(N)$ -каскадний алгоритм для синтезу N -точкових наборів даних. Поряд з мультифрактальними проаналізовано статистичні властивості другого порядку моделі.

Схема, яку отримано для узгодження моделі з результатами реальних даних, демонструє її ефективність, і можливість застосування запропонованої моделі до синтезу мережевого трафіку. Гнучкість і точність як моделі, так і

процедури згладжування призводять до близької відповідності зі статистичними характеристиками реальних даних (графіки дисперсії-часу і миттєвого масштабування) і поведінки черг.

Також проведено дослідження експоненційних часових шкал, що використовуються при вивченні організації черг КМ ОКЗ. Доведено, що експоненційні часові шкали є оптимальними для фрактального трафіку в сенсі узгодження необхідної точності і обчислювальної потужності, необхідної для обчислення апроксимації максимуму. Додатки можуть виконувати точні апроксимації ймовірності хвоста черги з використанням статистичних характеристик трафіку лише на кількох окремих експоненційних часових шкалах.

Наприкінці розділу удосконалено метод передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ, призначений для використання в протоколі транспортного рівня TCP Freeze. Показано, що зміна статичних параметрів (пропускна здатність з'єднання в бездротовому сегменті, розмір черги в маршрутизаторі, час поширення сигналу в з'єднанні) протоколів призводить до зміни розміру ковзаючого вікна. Отже, за допомогою зміни значень таких статично заданих параметрів можна виконувати зміну динаміки протоколу TCP Freeze, яка має безпосередній вплив на його пропускну здатність. Алгоритм методу з урахуванням запропонованої модифікації наведено на рис. 5.

Використання запропонованого методу дозволяє зменшити час передачі інформації в бездротовій мережі внаслідок реалізації алгоритму управління розміром ковзаючого вікна протоколу, що згладжує флуктуації останнього і призводить до меншого числа повторних передач пакетів даних, а також обробку події «хендовер».

Шостий розділ присвячено дослідженню моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ. Розроблено послідовності застосування моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КС ОКЗ. Досліджено особливості реконфігурації архітектури КС ОКЗ. Проведено аналіз особливостей, що виникають при реконфігурації таких систем без обмежень і з обмеженнями на ресурси. Запропоновано та обґрунтовано вирази, що дозволяють визначити параметри архітектури системи щодо кількості середніх втрат в одиницю часу. Наведено результати експериментального дослідження аспектів реконфігурації бездротових компонент КМ ОКЗ. Наведено результати проведеного дослідження аспектів безпеки хмарної компоненти КМ ОКЗ та запропоновано метрику, що надає можливість порівняння різних політик безпеки. Така метрика є універсальною метрикою оцінки ступеня безпеки КМ ОКЗ і може бути використана як при оцінці політики безпеки КМ ОКЗ, що існують, так і при розробці перспективних політик безпеки.

Метрику легко можна реалізувати за наявності досить тривалих спостережень за безпекою мережі, що протоколюються. Наявність ряду допоміжних коефіцієнтів дозволяє варіювати параметри мережевої політики безпеки. Наведені найбільш важливі експериментальні дослідження ефективності запропонованих в дисертаційній роботі результатів. Ілюстрацію послідовності застосування моделей та методів синтезу архітектур комп'ютерних систем ОКЗ наведено на рис. 6.

При дослідженні ефективності запропонованих результатів розглядалася типова архітектура компонент КС ОКЗ, що наведена на рис. 7.

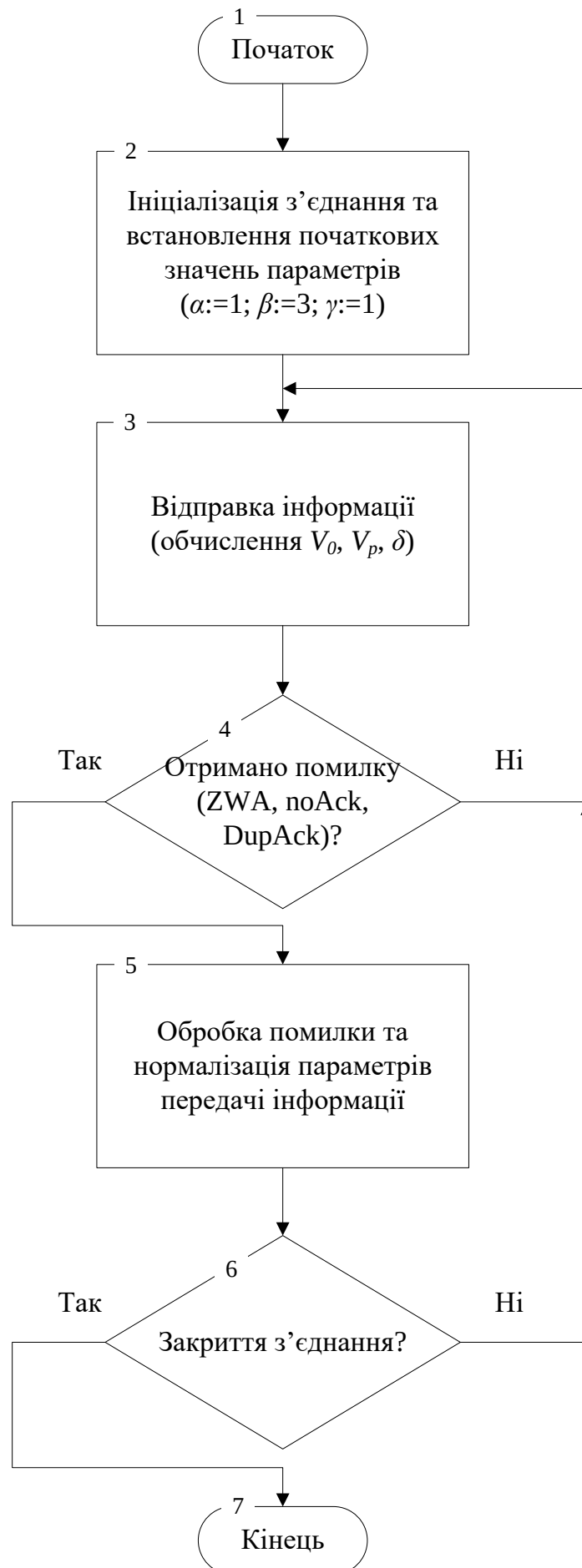


Рисунок 5 – Алгоритм методу передачі інформації

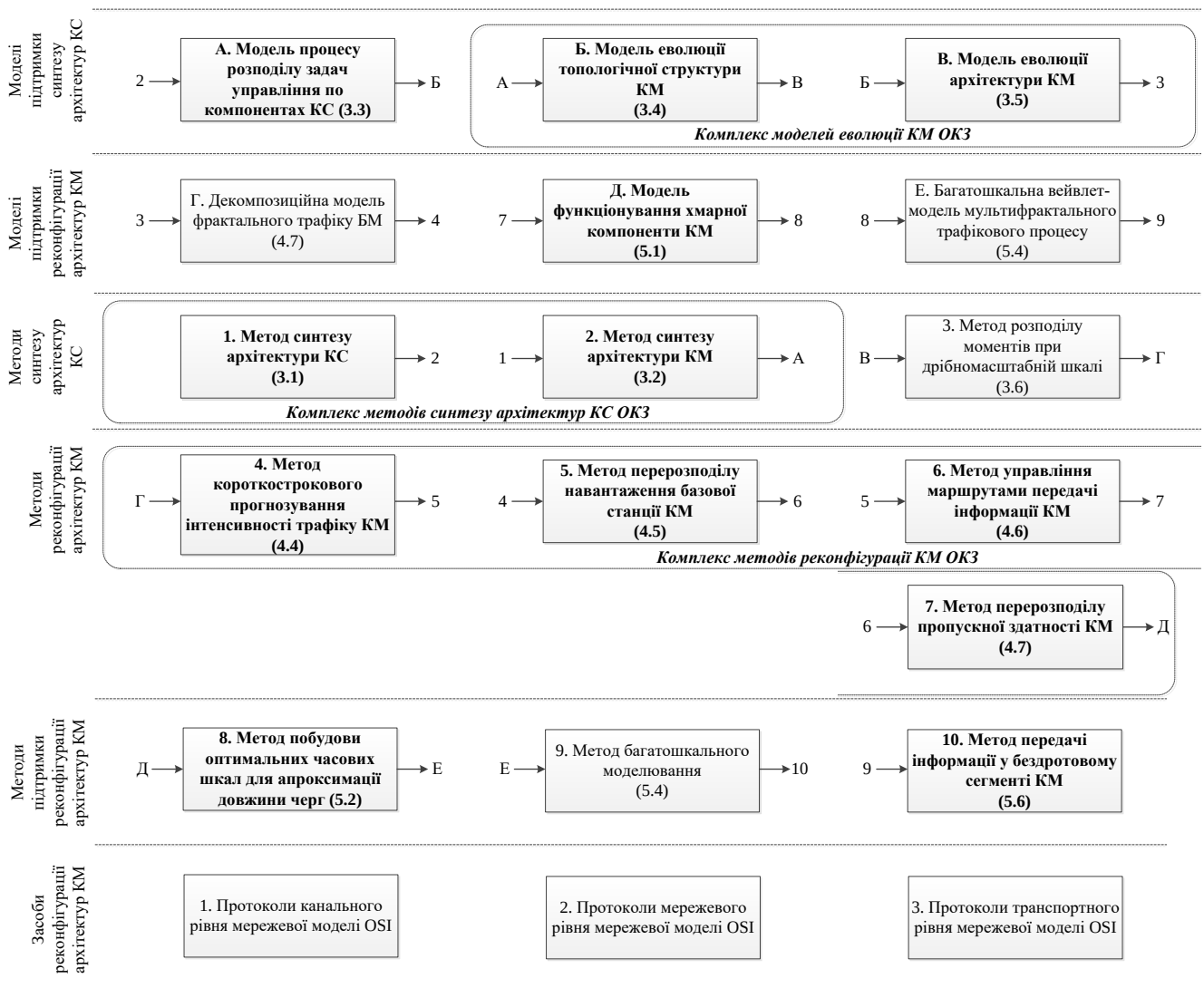


Рисунок 6 – Моделі, методи та засоби реалізації процесів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ

Результати застосування моделі процесу розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ наведено на рис. 8; це призводить до виграшу за часом отримання розподілу (T_z) на складних задачах (розмірністю $N_z = 35$ та більше), за рахунок їх декомпозиції. Виграш дедалі збільшується при збільшенні розмірності задачі у порівнянні з існуючими моделями. За допомогою розробленого комплексу методів було синтезовано архітектуру КС, яка відрізняється від існуючої.

В якості метрик ефективності було обрано час виконання транзакції в КС та розмір відповідної КМ. Графіки для отриманих результатів наведено на рис. 9, де використано такі позначення: T_{tr} – час виконання транзакції в КС, $N_{км}$ – розмір КМ, $T_{оп}$ – рівень вимог з оперативності.

Наведено результати експериментального дослідження аспектів реконфігурації бездротових компонент КМ ОКЗ. Так, експериментально встановлено, що врахування події «хендовер» в бездротових компонентах КМ ОКЗ дозволяє виконувати більш рівномірний перерозподіл пропускної здатності в різних зонах обслуговування, що призводить до значно меншої кількості перевантажень.

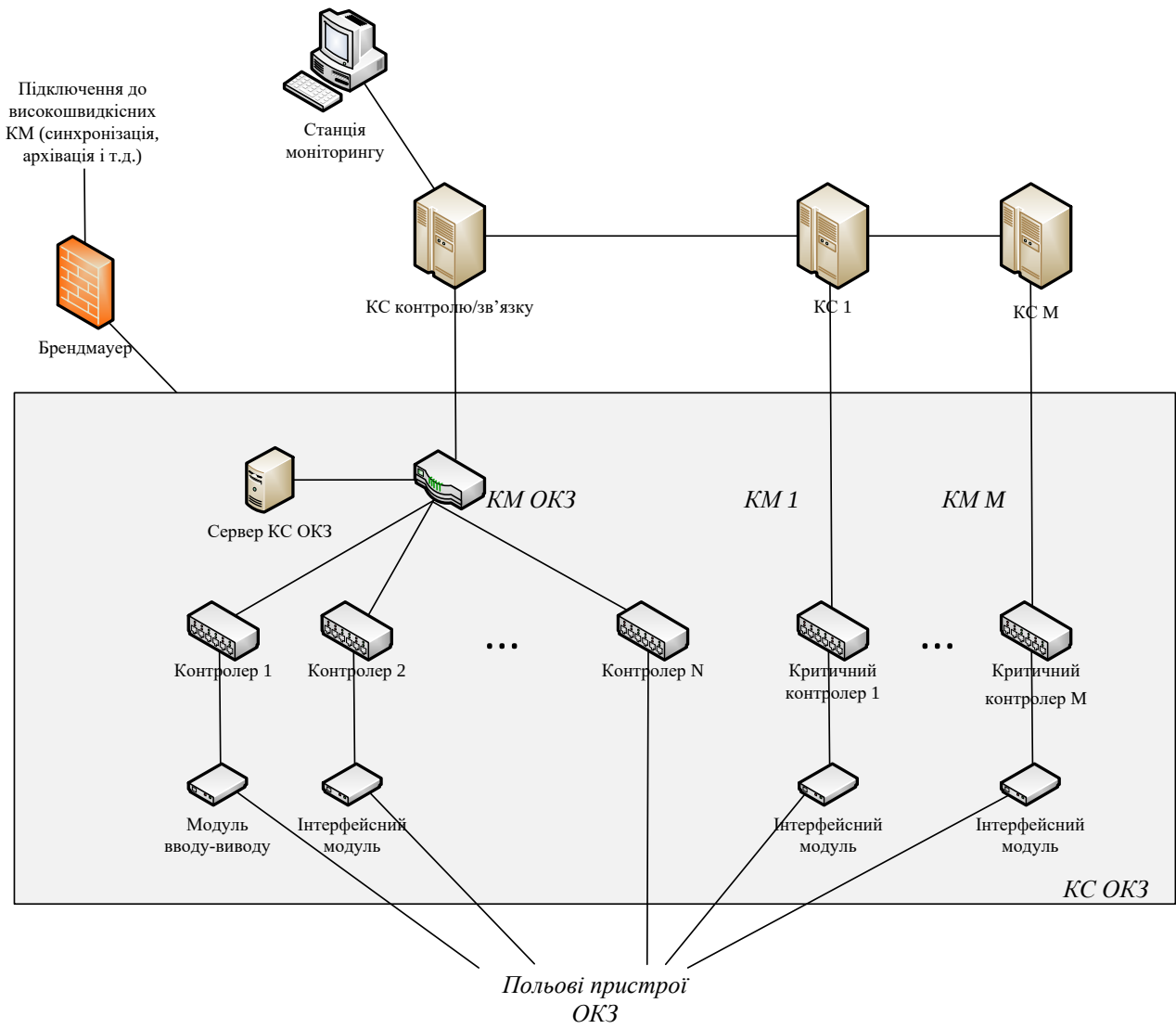


Рисунок 7 – Типова архітектура компонент КС ОКЗ

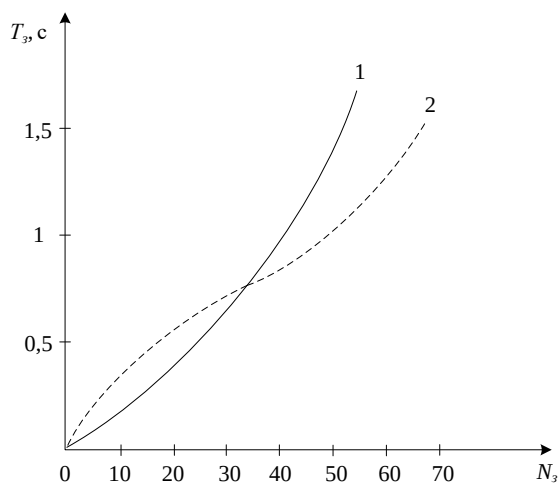


Рисунок 8 – Залежність часу рішення задачі в КС від її розмірності

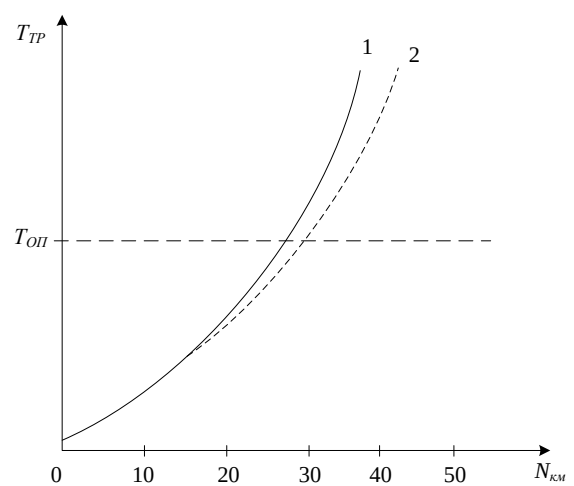


Рисунок 9 – Залежність часу виконання транзакції в КС від розміру КМ

Результатом застосування методу управління маршрутами передачі інформації у бездротових компонентах КМ ОКЗ є зменшення часу передачі інформації. При отриманні результатів в якості метрик ефективності було обрано час передачі інформації та їх об'єм.

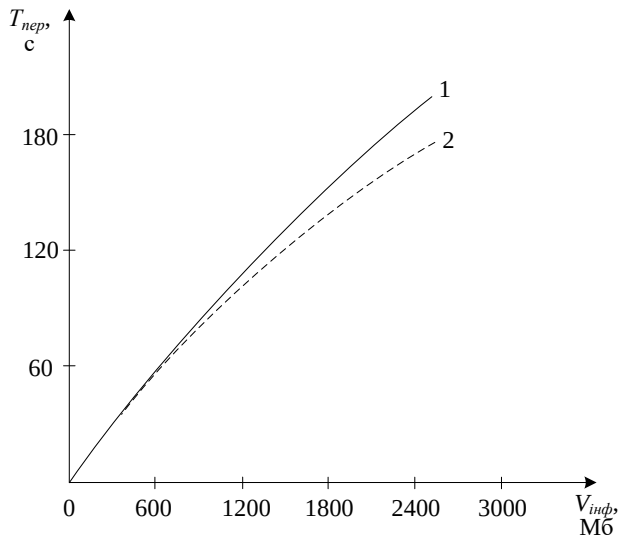


Рисунок 10 – Залежність часу передачі інформації від її об'єму

Графік їх залежності для запропонованого методу наведено на рис. 10, де використано такі позначення: $T_{пер}$ – час передачі, $V_{инф}$ – об'єм інформації.

На основі проведених експериментальних досліджень, можна стверджувати, що застосування запропонованого комплексу методів реконфігурації КМ ОКЗ дозволяє зменшити час передачі інформації на 8-12%. Відповідні графіки у вигляді

залежностей середнього часу передачі інформації в КМ від її середньої пропускної здатності (при незмінному об'ємі інформації) та середнього часу передачі інформації від її об'єму (при незмінній пропускній здатності) представлено на рис. 11 та 12, відповідно, де використано такі позначення: $T_{ср}$ – середній час передачі інформації, $C_{ср}$ – середня пропускна здатність, $V_{инф}$ – об'єм інформації.

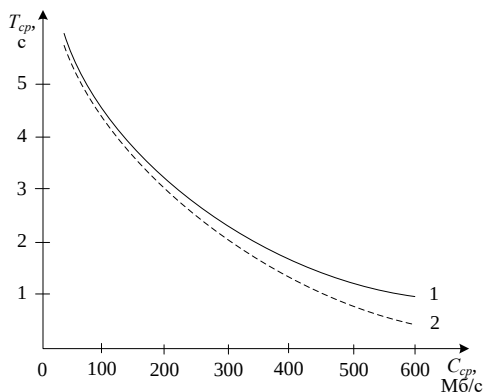


Рисунок 11 – Залежність середнього часу передачі інформації в КМ від її середньої пропускної здатності

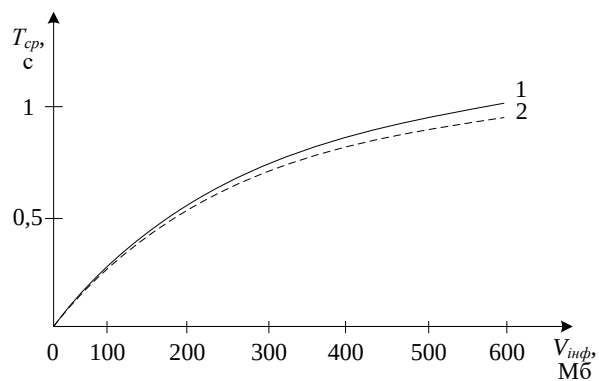


Рисунок 12 – Залежність середнього часу передачі інформації в КМ від її об'єму

Застосування удосконаленого методу передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ дозволило зменшити час передачі інформації. Метод було реалізовано на транспортному рівні моделі OSI у вигляді протоколу передачі інформації, а в якості метрик ефективності було обрано розмір ковзаючого вікна та час передачі інформації.

На рис. 13 – 16 наведено результати імітаційного моделювання в середовищі Network Simulator.

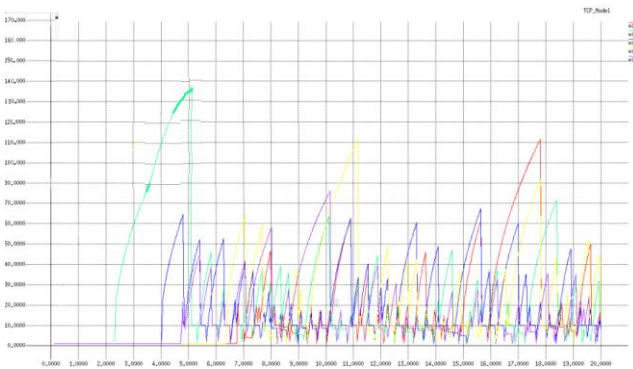


Рисунок 13 – Залежність розміру ковзаючого вікна від часу для 5 потоків на основі існуючого методу

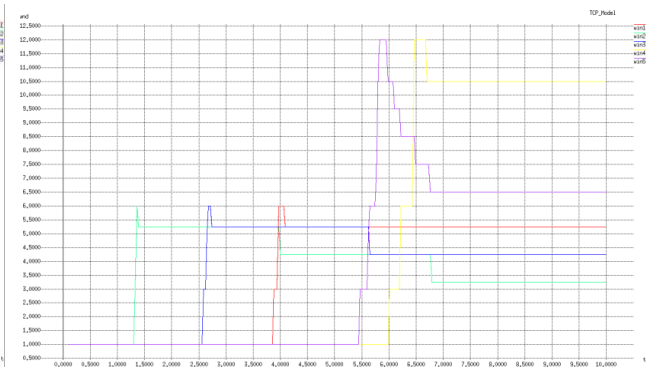


Рисунок 14 – Залежність розміру ковзаючого вікна від часу для 5 потоків на основі удосконаленого методу

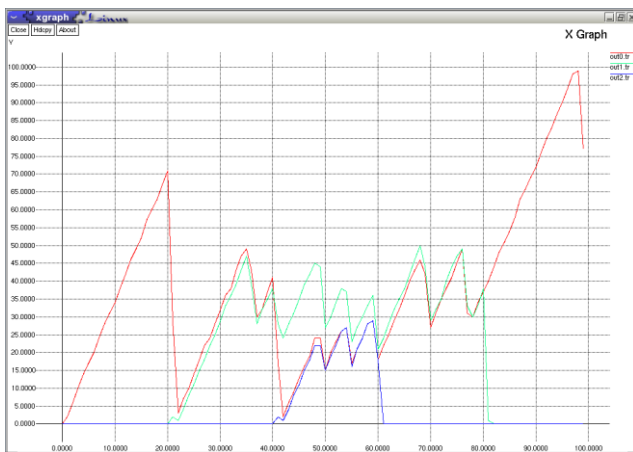


Рисунок 15 – Залежність миттєвої швидкості з'єднань від часу для сценарію, що включає оригінальні версії транспортних протоколів (TCP Freeze, TCP Reno, UDP)



Рисунок 16 – Залежність миттєвої швидкості з'єднань від часу для сценарію, що включає з'єднання реалізацією удосконаленого методу

Отже, до найбільш важливих експериментальних досліджень ефективності запропонованих в дисертаційній роботі результатів можна віднести такі:

- застосування запропонованого комплексу методів синтезу архітектур КСiМ ОКЗ призводить до виграшу на 5-15% в термінах часу виконання транзакції в КС, що має в основі КМ аналогічного розміру, в порівнянні з КС ОКЗ, що існують;

- застосування удосконаленої моделі процесу розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ призводить до виграшу на складних задачах (розмірністю 35 та більше), за рахунок їх декомпозиції; виграш дедалі збільшується при збільшенні розмірності задачі у порівнянні з існуючими моделями;

- застосування запропонованого комплексу методів реконфігурації КМ ОКЗ дозволяє зменшити час передачі інформації на 8-12%;

- застосування удосконаленого методу передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ дозволяє досягти зменшення часу передачі інформації на 10-20% за наявності фонового трафіку.

У додатках наведено список публікацій, результати теоретичних досліджень, а також документи, що підтверджують практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено основні результати розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення вимог з оперативності процесу обміну інформацією в КС ОКЗ на основі розробки математичного апарату (математичних моделей і методів) синтезу нових і реконфігурації існуючих архітектур комп'ютерних систем і мереж.

Це дало змогу отримати такі нові наукові і практичні результати:

1) проведено аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку КС ОКЗ, а також відповідних основних факторів і підходів, вимог до їх архітектур; аналіз охоплював сучасне базове технічне та програмне забезпечення КС ОКЗ, вимоги до архітектур КС ОКЗ, особливості їх інформаційного забезпечення, базове забезпечення та визначено фактори впливу на КС ОКЗ, основні методи взаємодії з архітектурами КС ОКЗ, загальні підходи до оптимізації їх архітектур, методи аналізу архітектур та методи аналізу інформаційних потоків;

2) проведено аналіз моделей і методів дослідження процесів синтезу і реконфігурації архітектур КСіМ ОКЗ; аналіз охоплював алгоритми вирішення задач дискретного програмування, часові шкали для побудови адекватних моделей сучасного трафіку, моделі мережевого трафіку, який використовується при аналізі черг;

3) розроблено моделі підтримки синтезу архітектур КСіМ ОКЗ; до таких моделей відносяться модель процесу розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ за рахунок декомпозиції глобальної оптимізаційної задачі на окремі підзадачі, що дозволяє при великих розмірностях отримати рішення відповідної задачі оптимізації та комплекс моделей еволюції архітектур КМ ОКЗ, який враховує динаміку розвитку архітектури КС і базується на балансуванні навантаження мереж, що дозволяє виконати прогноз змін архітектури мережі протягом фіксованого часового інтервалу;

4) розроблено методи синтезу архітектур КСіМ ОКЗ з врахуванням реалізації методів розв'язання вхідних задач, вимог до компонентів, розподілу задач по компонентах, критерію якості і можливих обмежень; такі методи представлено у вигляді розробленого комплексу методів багатопараметричного синтезу архітектур КС ОКЗ (метод синтезу архітектури КС ОКЗ та метод синтезу архітектури КМ ОКЗ), який базується на їх стратифікації на інформаційному та технічному рівнях та оптимізує витрати на побудову компонентів об'єкту критичного застосування, котрі забезпечують виконання вимог з оперативності;

5) розроблено модель підтримки реконфігурації архітектур КМ ОКЗ, а саме дістала подальшого розвитку математична модель процесу розподілу задач по компонентах розподіленої комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування за рахунок декомпозиції глобальної оптимізаційної задачі на окремі підзадачі, що дозволяє при великих розмірностях суттєво прискорити рішення відповідної задачі оптимізації;

6) розроблено методи реконфігурації архітектур КМ ОКЗ з врахуванням задач моделювання трафіку, управління трафіком, чергами, навантаженням вузлів, маршрутами та пропускнуою здатністю; такі методи представлено у вигляді розробленого комплексу методів реконфігурації КМ ОКЗ (метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку бездротової компоненти КМ ОКЗ, метод перерозподілу навантаження базової станції бездротової компоненти КМ ОКЗ, метод управління маршрутами передачі інформації в бездротовій компоненті КМ ОКЗ, метод перерозподілу пропускнуої здатності в бездротовій компоненті КМ ОКЗ), який враховує специфіку трафіку та характерних для об'єктів критичного застосування процесів в мережі і базується на використанні кратномасштабного дискретного вейвлет-перетворення, що дозволяє скорегувати множину параметрів функціонування бездротових компонентів мережі для зменшення часу передачі інформації; крім того, удосконалено метод побудови оптимальних часових шкал для апроксимації довжини черг комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування, який відрізняється від відомих використанням результатів короткострокового прогнозу поведінки трафіку, що дозволяє визначити довжину черг при реконфігурації мережі та удосконалено метод передачі інформації у бездротовому сегменті комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування, який відрізняється від відомих врахуванням події «хендовер», що призводить до зменшення часу передачі інформації;

7) проведено порівняльну оцінку розроблених та існуючих моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КСіМ ОКЗ за результатами якої доведено ефективність запропонованих рішень;

8) досліджено та впроваджено розроблені моделі та методи синтезу і реконфігурації архітектур КСіМ ОКЗ;

9) практичні результати, що отримано, підтверджені актами впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу ефективність розроблених моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КСіМ ОКЗ. Результати роботи впроваджені: в Державному підприємстві «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості», в Державному підприємстві «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування», в ТОВ «НВП «Радікс», у Харківському національному університеті радіоелектроніки, у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

Подальші дослідження синтезу і реконфігурації архітектур КСіМ ОКЗ пов'язані з розробкою методології багатопараметричного синтезу і реконфігурації архітектур КСіМ ОКЗ із максимально можливим врахуванням вимог зеленого комп'ютингу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kovalenko A., Kharchenko V., Andrashov A., Sklyar V., Siora A. Gap-and-IMECA-Based Assessment of I&C Systems Cyber Security. *Complex Systems and*

Dependability. Advances in intelligent and soft computing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. Pp. 149-164.

Здобувачем запропоновано підхід та методичку оцінювання необхідного рівня оперативності розподілених КС ОКЗ.

2. Kovalenko A., Kharchenko V., Andrashov A. Security of Safety Important I&C Systems. *Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems for Safety and Security.* Hershey, Pennsylvania, United States of America, IGI Global, 2014. Pp. 233-270.

Здобувачем запропоновано метод аналізу рівня оперативності КС ОКЗ.

3. Kovalenko A., Shamraev A., Shamraeva E., Dovbnya A., Ilyunin O. Green Microcontrollers in Control Systems for Magnetic Elements of Linear Electron Accelerators. *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. Studies in Systems, Decision and Control series.* Springer International Publishing Switzerland, 2017. Pp. 283-305.

Здобувачем розроблено аспекти організації КС ОКЗ та їх реконфігурації.

4. Kovalenko A., Kuchuk G., Kharchenko V., Shamraev A. Resource-Oriented Approaches to Implementation of Traffic Control Technologies in Safety-Critical I&C Systems. *Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control series.* Springer International Publishing Switzerland, 2017. Pp. 313-337.

Здобувачем розроблено принципи підвищення оперативності КС ОКЗ.

5. Коваленко А.А. Огляд моделей трафіка, які використовуються під час аналізу черг. *Системи озброєння і військова техніка* : науковий журнал. 2008. № 4(16). С. 130-132.

6. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Асимптотический анализ очередей высокоскоростных телекоммуникационных сетей. *Системи обробки інформації.* Харків : ХУПС, 2008. Вип. 7(74). С. 67-73.

Здобувачем проведено дослідження необхідної точності і обчислювальної потужності, що вимагається для обчислення апроксимації максимуму.

7. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Обзор подходов к выбору временных шкал при проведении анализа очередей. *Системи обробки інформації.* Харків : ХУПС, 2009. Вип. 1(75). С. 68-71.

Здобувачем розроблено модель мережевого трафіку, яка використовується при аналізі черг КМ.

8. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Метод построения оптимальных временных шкал для аппроксимации значения максимального размера очереди. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил.* Харків : ХУПС, 2009. Вип. 3(21). С. 93-96.

Здобувачем розроблено метод побудови оптимальних часових шкал.

9. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Многошкальное вейвлет-моделирование трафика мультисервисных сетей. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* : науково-технічний журнал. 2009. № 6(40). С. 231-239.

Здобувачем розроблено метод багатошкального моделювання.

10. Коваленко А.А., Можаяев О.О., Завизістун Ю.Ю. Аналіз поведінки черг маршрутизаторів у мережах передачі даних в залежності від типів трафіку. *Системи озброєння і військова техніка* : науковий журнал. 2009. № 2(18). С. 103-105.

Здобувачем проведено дослідження поведінки черг маршрутизаторів в залежності від типів трафіку.

11. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Оценка безопасности мультисервисной сети. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків : ХУПС, 2009. Вип. 4(22). С. 89-94.

Здобувачем розроблено підхід до визначення метрики безпеки мережі.

12. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Построение экспоненциальных временных шкал при анализе очередей мультисервисных сетей. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи : науково-технічний журнал*. 2010. № 7(48). С. 257-262.

Здобувачем виконано обґрунтування оптимальності експоненційних часових шкал для аналізу черг.

13. Коваленко А.А., Завизиступ Ю.Ю., Мохаммад А.С., Можаяев М.А. Особенности функционирования протоколов в беспроводных сетях. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2010. Вип. 5(86). С. 39-42.

Здобувачем запропоновано методи передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ.

14. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Завизиступ Ю.Ю. Применение мультифрактальных спектров для моделирования трафика мультисервисных сетей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Київ : ДП «ЦНДІ НІУ», 2010. Вип. 2(14). С. 207-214.

Здобувачем запропоновано мультифрактальні спектри для дрібномасштабного аналізу.

15. Коваленко А.А., Мохаммад А.С., Завизиступ Ю.Ю. Анализ факторов, влияющих на пропускную способность беспроводных сетей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Київ : ДП «ЦНДІ НІУ», 2011. Вип. 2(18). С. 260-264.

Здобувачем запропоновано підходи до підвищення пропускної здатності бездротових компонент КМ.

16. Коваленко А.А., Мохаммад А.С., Завизиступ Ю.Ю. Метод перераспределения нагрузки базовой станции в технологии WIMAX. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2011. Вип. 5(95). С. 212-217.

Здобувачем розроблено метод перерозподілу навантаження базової станції в бездротових компонентах КМ ОКЗ.

17. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Мохаммад А.С. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Київ : ДП «ЦНДІ НІУ», 2011. Вип. 3(19). С. 209-213.

Здобувачем розроблено метод управління маршрутами передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ.

18. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Мохаммад А.С. Метод перераспределения пропускной способности для уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків : ХУПС, 2011. Вип. 3(29). С. 140-145.

Здобувачем розроблено декомпозиційну модель фрактального трафіку бездротових компонент КМ ОКЗ.

19. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Мохаммад А.С. Метод параметрического управления передачей данных для модификации транспортных протоколов

беспроводных сетей. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2011. Вип. 8(98). С. 211-218.

Здобувачем розроблено метод передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ на основі параметричного управління.

20. Kovalenko A., Kharchenko V., Siora A. GAP- and HTTP-based analysis of safety-critical systems. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* : науково-технічний журнал. 2012. № 7(59). С. 198-204.

Здобувачем розроблено методику аналізу рівня оперативності КС ОКЗ.

21. Коваленко А.А., Завизиступ Ю.Ю., Кучук Г.А., Дейнеко Ж.В. Предиктивное управление интенсивностью трафика в беспроводных сетях передачи данных. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2013. Вип. 4(111). С. 123-129.

Здобувачем розроблено метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку бездротових компонент КМ ОКЗ.

22. Коваленко А.А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2014. Вип. 1(117). С. 180-184.

23. Коваленко А.А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків : ХУПС, 2014. Вип. 1(38). С. 116-119.

24. Коваленко А.А. Подходы к оптимизации распределения задач управления по компонентам компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України* : науково-технічний журнал. 2014. № 2(15). С. 158-160.

25. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Янковский А.А. Модель процесса эволюции топологической структуры компьютерной сети системы управления объектом критического применения. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2014. Вип. 7(123). С. 93-96.

Здобувачем розроблено математичну модель процесу еволюції топологічної структури КМ ОКЗ.

26. Коваленко А.А. Формализация задач планирования эволюции информационной структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2014. Вип. 9(125). С. 135-137.

27. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Можаяев А.А. Выбор комбинаторного алгоритма оптимизации при управлении трафиком мультисервисной сети. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2015. Вип. 10(135). С. 97-102.

Здобувачем розроблено алгоритм методу динамічного програмування.

28. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Використання методів зміну простору рішень для оптимізації управління трафіком мультисервісних мереж. *Системи обробки інформації*. Харків : ХУПС, 2016. Вип. 5(142). С. 128-132.

Здобувачем розроблено алгоритм реалізації методів зміни простору рішень.

29. Коваленко А.А., Брежнев Е.В., Ильяшенко О.А. Обеспечение информационной безопасности ИУС, важных для безопасности: процессный

подход на основе системы менеджмента качества. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* : науково-технічний журнал. 2016. № 5(79). С. 26-32.

Здобувачем розроблено процесний підходи до забезпечення необхідного рівня оперативності складних КС ОКЗ.

30. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Оптимальное управление трафиком мультисервисной сети на основе методов последовательного улучшения решений. *Системи озброєння і військова техніка* : науковий журнал. 2016. № 3(47). С. 59-63.

Здобувачем розроблено класифікацію типів алгоритмів методів послідовного покращення рішень.

31. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава : ПНТУ, 2018. Вип. 1(47). С. 110-113.

Здобувачем розроблено підходи до розвитку сучасних КС ОКЗ.

32. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Нечаусов С.М. Інформаційні технології синтезу і реконфігурації структур комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2018. Вип. 2(48). С. 73-76.

Здобувачем розроблено схеми послідовності застосування моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ ОКЗ.

33. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи* : науково-технічний журнал. Харків: НТУ «ХП», 2018. Т. 2, № 1. С. 22-27.

Здобувачем розроблено методи синтезу архітектур КСiМ ОКЗ.

34. Kovalenko A., Androulidakis I., Kharchenko V. IMECA-Based Technique for Security Assessment of Private Communications : Technology and Training. *Information & Security : An International Journal*. 35. no. 1 (2016). Pp. 99-120.

Здобувачем розроблено методiku оцінювання і забезпечення оперативності комунікації КС і КМ.

35. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Автоматичний контроль та управління параметрами ДТЗ-трафіка комп'ютерних систем критичного призначення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2016. Вип. 4(40). С. 24-28.

Здобувачем розроблено математичну модель трафіку.

36. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Метод управления реконфигурацией информационной структуры компьютерной системы объекта критического применения при включении оперативных задач в систему управления. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2017. Вип. 1(41). С. 107-110.

Здобувачем розроблено метод реконфігурації КС ОКЗ.

37. Коваленко А.А., Кучук Г.А., Лукова-Чуйко Н.В. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2017. Вип. 2(42). С. 117-120.

Здобувачем розроблено математичну модель функціонування хмарної компоненти КМ ОКЗ.

38. Kovalenko A., Kuchuk H., Ruban I. Load distribution of basic stations in mobile communication networks. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості* : науково-виробничий журнал. 2017. № 1 (1). С. 75-81.

Здобувачем розроблено метод рівномірного розподілу навантаження базової станції в бездротових компонентах КМ ОКЗ.

39. Коваленко А.А. Метод построения оптимальных временных шкал для аппроксимации характеристик очереди. Проблемы информатики и моделирования : Сб. тез. докл. по матер. 9-й межд. научно-технической конф. (26-28 листопада 2009, Харків). Харків : НТУ «ХПИ», 2009. С. 43.

40. Kovalenko A., Kuchuk G., Mozhaev A. An Approach to Development of Complex Metric for Multiservice Network Security Assessment. *Statistical Methods of Signal and Data Processing* (October 13-14, 2010, Kyiv, Ukraine): Proceedings. Kyiv, NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP, 2010. P. 158-160.

Здобувачем розроблено підхід до визначення метрики безпеки мережі.

41. Коваленко А.А. Выбор моделей трафика для проведения анализа очередей. *Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку* : матеріали першої міжнародної НТК (5-6 липня 2010, Київ). Київ : ДП «ЦНДІ НіУ», 2010. С. 54.

42. Коваленко А.А., Завизиступ Ю.Ю., Мохаммад А.С. Подходы к разработке метода перераспределения пропускной способности для уменьшения времени передачи данных в беспроводных сетях. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : матеріали другої міжнародної НТК (15-16 грудня 2011, Київ). Київ : ДП «ЦНДІ НіУ», 2011. С. 38-39.

Здобувачем розроблено метод перерозподілу навантаження базової станції в бездротових компонентах КМ.

43. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Особенности функционирования беспроводных компонент в телекоммуникационных сетях. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : Сб. тез. доповідей по матер. 8-ї наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (18-19 квітня 2012, Харків). Харків : ХУПС, 2012. С. 193.

Здобувачем проведено дослідження функціонування бездротових компонент КМ.

44. Kovalenko A., Kharchenko V., Andrashov A., Siora A. Cyber Security of FPGA-Based NPP I&C Systems: Challenges and Solutions. *Proceeding of the 8th International Conference on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies* (July 22-26, 2012, San Diego). San Diego, California, USA, 2012. Vol. 2. Pp. 1338-1349.

Здобувачем проведено дослідження підходів до забезпечення необхідного рівня оперативності розподілених КС ОКЗ.

45. Kovalenko A., Kharchenko V., Illiashenko O. Cyber Security Lifecycle and Assessment Technique for FPGA-based I&C Systems. *Proceeding of IEEE East-West Design & Test Symposium* (September 14-17, 2012, Kharkiv). Kharkiv, Ukraine, 2012. Pp. 432-436.

Здобувачем проведено дослідження підходів до аналізу та оцінювання розподілених КС ОКЗ.

46. Коваленко А.А., Завизіступ Ю.Ю., Мохаммад А.С. Подходы к управлению трафиком в телекоммуникационных сетях. *Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем* : матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції (25-29 вересня 2012, Алушта). Алушта, Харків : НТУ «ХПІ», 2012. С. 168.

Здобувачем проведено дослідження трафіку КМ ОКЗ.

47. Kovalenko A., Illiashenko O., Kharchenko V. Gap-IMECA technique and tool for assessing of FPGA-based I&C systems cybersecurity. *Proceeding of 3rd International Workshop "Critical Infrastructure Safety and Security"* (May 23-26, 2013, Sevastopol). Sevastopol, Ukraine, 2013. P. 14.

Здобувачем розроблено методику оцінювання рівня оперативності і безпеки багатокомпонентних КС ОКЗ.

48. Коваленко А.А. Подходы к выбору и формализации параметров ресурсов распределенных систем. *Проблеми інформатизації* : матеріали першої міжнародної НТК (19-20 грудня 2013, Черкаси). Черкаси: ЧДТУ; Київ: ДУТ; Полтава: ПНТУ, 2013. С. 28-29.

49. Коваленко А.А. Синтез технической структуры компьютерной системы, обеспечивающей функционирование системы управления критического применения. *Проблеми інформатизації* : матеріали другої міжнародної НТК (12-13 квітня 2014, Київ). Київ: ДУТ; Полтава: ПНТУ; Катовице: Катовицький економічний університет; Париж: Університет Париж VII Венсант-Сен-Дені, 2014. С. 52.

50. Kovalenko A. Approach to certify PLC configuration tools to meet functional safety requirements. *DEpendable Systems, SERvices and Technologies* : Proceeding of 7th International Conference (May 16-18, 2014, Kyiv). Kyiv, Ukraine, 2014. P. 21.

51. Kovalenko A., Kharchenko V., Illiashenko O., Boyarchuk A., Sklyar V. Security Informed Safety Assessment of NPP I&C Systems: GAP-IMECA Technique. *Proceedings of 22nd International Conference on Nuclear Engineering. Technical Publication ICONE22-31175* (July 7-11, 2014, Prague). Prague, Czech Republic, 2014. Volume 3: Next Generation Reactors and Advanced Reactors; Nuclear Safety and Security. Pp. 123-132.

Здобувачем розроблено елементи підходу до оцінювання рівня оперативності розподілених КС ОКЗ.

52. Коваленко А.А., Кучук Г.А. Анализ подходов к моделированию процесса эволюции топологических структур компьютерных сетей. *Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем* : матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції (21-23 жовтня 2014, Харків). Харків, НТУ «ХПІ», 2014. С. 42-43.

Здобувачем проведено аналіз та моделювання процесу еволюції КМ ОКЗ.

53. Kovalenko A., Andrashov A., Bakhmach E., Sklyar V. FPGA-based I&C Applications in NPP's Modernization Projects: Case Study. *Proceeding of the 9th International Conference on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies* (February 23-26, 2015, Charlotte). Charlotte, North Carolina, USA, 2015. Vol. 1. Pp. 113-120.

Здобувачем проведено аналіз використання запропонованих методів синтезу та реконфігурації на прикладі реальних ОКЗ.

54. Коваленко А.А., Соловйов Д.Н. Метод уменьшения времени передачи данных в беспроводной сети технологии Wi-Fi. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : матеріали п'ятої міжнародної НТК (23-24 квітня 2015, Полтава). Полтава: ПНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Харків: ДП «ХНДІ ТМ», 2015. С. 18.

Здобувачем запропоновано принципи розробки методу управління маршрутами передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ.

55. Kovalenko A., Kharchenko V., Sklyar V., Siora A. Security Assessment of FPGA-based Safety-Critical Systems: US NRC Requirements Context. *Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies* (July 7-9, 2015, Zilina). Zilina, Slovakia, 2015. Pp. 117-123.

Здобувачем розроблено контекст-специфічний метод оцінювання актуального рівня оперативності КС ОКЗ на програмованій логіці.

56. Kovalenko A., Kharchenko V., Sklyar V. Secure Environment Establishment for FPGA-based Safety-Critical Systems. *Proceeding of IEEE East-West Design & Test Symposium* (September 26-29, 2015, Batumi). Batumi, Georgia, 2015. Pp. 88-92.

Здобувачем розроблено підхід до забезпечення оперативності і безпеки розподілених КС ОКЗ.

57. Kovalenko A., Kuchuk G., Kharchenko V., Ruchkov E. Approaches to Selection of Combinatorial Algorithm for Optimization in Network Traffic Control of Safety-Critical Systems. *Proceeding of IEEE East-West Design & Test Symposium* (October 14-17, 2016, Yerevan). Yerevan, Armenia, 2016. Pp. 384-389.

Здобувачем розроблено підходи до оптимізації трафіку КС ОКЗ.

58. Kovalenko A., Kharchenko V., Brezhniev I., Leontiiev K. Secure Environment Establishment for FPGA-based Safety-Critical Systems: Quality Management System Context. *Proceeding of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies* (June 11-15, 2017, San Francisco). San Francisco, California, USA, 2017. Pp. 434-441.

Здобувачем розроблено підхід до забезпечення умов функціонування і забезпечення оперативності розподілених КС ОКЗ.

59. Kovalenko A., Kharchenko V., Leontiiev K., Babeshko E. Cyber security assurance approaches for FPGA-based safety platform configuration tool. *Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies* (July 5-7, 2017, Zilina). Zilina, Slovakia, 2017. Pp. 161-165.

Здобувачем розроблено підхід до використання засобів реконфігурації розподілених КС ОКЗ.

АНОТАЦІЇ

Коваленко А.А. Моделі та методи синтезу і реконфігурації архітектур комп'ютерних систем і мереж об'єктів критичного застосування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Національний технічний

університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми забезпечення вимог з оперативності процесу обміну інформацією в комп'ютерних системах (КС) об'єктів критичного застосування (ОКЗ) на основі розробки математичного апарату (математичних моделей і методів) синтезу нових і реконфігурації існуючих архітектур комп'ютерних систем і мереж.

Проведено аналіз стану проблеми, тенденцій розвитку КС ОКЗ, а також вимог до архітектур КС і мереж ОКЗ. В результаті встановлено, що на даний момент існуючі моделі та методи синтезу і реконфігурації КС ОКЗ не завжди призводять до забезпечення вимог з оперативності процесу обміну інформацією в КС і мережах (КСіМ) ОКЗ. Ця обставина визначає необхідність удосконалення відповідного класичного математичного інструментарію для підвищення оперативності передачі інформації.

Розроблено комплекс методів багатопараметричного синтезу архітектур КСіМ ОКЗ, який оптимізує витрати на побудову компонентів КС об'єкту критичного застосування, котрі забезпечують виконання вимог з оперативності.

Дістала подальшого розвитку модель процесу розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ, що дозволяє при великих розмірностях суттєво прискорити рішення відповідної задачі оптимізації.

Розроблено комплекс моделей еволюції архітектур комп'ютерних мереж (КМ) ОКЗ, що дозволяє виконати прогноз змін архітектури мережі протягом фіксованого часового інтервалу.

Розроблено комплекс методів реконфігурації КМ ОКЗ, що дозволяє скорегувати множину параметрів функціонування бездротових компонентів мережі для зменшення часу передачі інформації.

Удосконалено математичну модель функціонування хмарної компоненти КМ ОКЗ, що дозволяє прискорити процес передачі інформації.

Удосконалено метод побудови оптимальних часових шкал для апроксимації довжини черг КМ ОКЗ, що дозволяє визначити довжину черг при реконфігурації мережі.

Удосконалено метод передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ, що призводить до зменшення часу передачі інформації.

Ключові слова: комп'ютерна система, комп'ютерна мережа, архітектура, синтез, реконфігурація, компонент, інформація, об'єкт критичного застосування.

Коваленко А.А. Модели и методы синтеза и реконфигурации архитектур компьютерных систем и сетей объектов критического применения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05. – компьютерные системы и компоненты. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Национальный

технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы обеспечения требований по оперативности процесса обмена информацией в компьютерных системах (КС) объектов критического применения (ОКП) на основе разработки математического аппарата (математических моделей и методов) синтеза новых и реконфигурации существующих архитектур компьютерных систем и сетей.

Проведен анализ состояния проблемы, тенденций развития КС ОКП, а также требований к архитектурам КС и сетей ОКП. В результате установлено, что на данный момент существующие модели и методы синтеза и реконфигурации КС ОКП не всегда приводят к обеспечению требований по оперативности процесса обмена информацией в КС и сетях (КСиС) ОКП. Это обстоятельство определяет необходимость совершенствования соответствующего классического математического инструментария для повышения оперативности передачи информации.

Подробно исследованы методы решения задач оптимизации процессов формирования и изменения архитектур. Проведен обзор подходов к выбору временных шкал для проведения анализа очередей и исследования возможности выбора временных шкал для построения адекватных моделей современного трафика. Проведено исследование моделей сетевого трафика, используемых при анализе очередей. Обоснован выбор обобщенного показателя эффективности функционирования КСиС ОКП и сформулированы в общем виде оптимизационные задачи минимизации выбранного критерия при наличии объективных ограничений, налагаемых характеристиками сети.

Разработан комплекс методов многопараметрического синтеза архитектур КСиС ОКП, который оптимизирует затраты на построение компонентов КС объекта критического применения, которые обеспечивают выполнение требований по оперативности.

Получила дальнейшее развитие модель процесса распределения задач по компонентам распределенной КС ОКП, что позволяет при больших размерностях существенно ускорить решение соответствующей задачи оптимизации.

Сформулирована проблема, возникающая при построении моделей топологических структур, учитывающих динамику развития конкретных компонент компьютерной сети ОКП. Разработан комплекс моделей эволюции архитектур компьютерных сетей ОКП, который позволяет выполнить прогноз изменений архитектуры сети в течение фиксированного временного интервала.

Исследовано наиболее значимые факторы, влияющие на пропускную способность беспроводных компонент компьютерных сетей ОКП, а также соответствующих методов повышения эффективности компьютерных сетей ОКП. Разработан комплекс методов реконфигурации компьютерных сетей ОКП, который позволяет скорректировать множество параметров функционирования беспроводных компонент сети для уменьшения времени передачи информации.

Усовершенствована математическая модель функционирования облачной компоненты компьютерной сети ОКП, которая позволяет ускорить процесс передачи информации.

Усовершенствован метод построения оптимальных временных шкал для аппроксимации длины очередей компьютерной сети ОКП, который позволяет определить длину очередей при реконфигурации сети.

Усовершенствован метод передачи информации в беспроводном сегменте компьютерной сети ОКП, приводящий к уменьшению времени передачи информации.

Приведены результаты экспериментального исследования аспектов синтеза и реконфигурации архитектур КСиС ОКП.

Ключевые слова: компьютерная система, компьютерная сеть, архитектура, синтез, реконфигурация, компонент, информация, объект критического применения.

Kovalenko A.A. Models and methods for synthesis and reconfiguration of computer systems and networks architectures of critical application objects. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty of 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Kharkiv National University of Radio Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to solving of actual scientific and applied problem of ensuring the operativeness requirements for information exchange process in computer systems (CS) of critical application objects (CAO) on the basis of mathematical apparatus (mathematical models and methods) development intended for synthesis of new and reconfiguration of existing architectures of computer systems and networks.

It was performed an analysis of the problem, appropriate trends of CAO CS, as well as the requirements for architectures of CAO CS and networks. The results revealed that currently existing models intended for synthesis and reconfiguration of CAO CS does not always lead to meet the operativity requirements for the process of information exchange in CAO CS and networks (CSN). This circumstance determines the need to improve the corresponding classical mathematical tools to increase the operativity of information transmission.

It was developed a complex of methods for multiparameter synthesis of CAO CSN that optimizes the costs of constructing components of the critical application object CS, which ensure the meeting of operativity requirements.

It was developed a further improvement for the model of tasks distribution process within the components of distributed CAO CS that allows significant accelerating the solution of the optimization problem in a case of large dimensions.

It was developed a complex of evolution models for CAO computer networks (CN) that allows executing the prediction of network architecture changes during a fixed time interval.

It was developed a complex of reconfiguration methods for CAO CN that allows adjusting the set of operation parameters of wireless components of the network in order to reduce the time of information transmission.

It was improved a mathematical model describing the operation of CAO CN cloud component that allows accelerating the process of information transmission.

It was improved a method of optimal time scales constructing for approximating the length of CAO CN queues that allows determining the length of queues during network reconfiguration.

It was improved a method for information transmission in a wireless segment of CAO CN that allows reducing the time of information transmission.

Keywords: computer system, computer network, architecture, synthesis, reconfiguration, component, information, critical application object.

