

Харківський національний університет радіоелектроніки

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Коваленко Андрій Анатолійович

УДК 004.415:004.051-021.412.1(043.3)

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

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

**05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти**

**123 – Комп'ютерна інженерія**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.А. Коваленко

(підпис)

Науковий консультант  
Кучук Георгій Анатолійович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

## АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти (123 – Комп'ютерна інженерія). – Харківський національний університет радіоелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми підвищення 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 (КСіМ).

На основі аналізу сучасного базового технічного та програмного забезпечення КС ОКЗ сформульовано загальні вимоги, а також вимоги до їх компонент. Визначено тенденції розвитку та існуючі потреби таких КС. Це дозволило сформулювати вимоги до архітектур КС ОКЗ та проаналізувати особливості їх інформаційного забезпечення, базового забезпечення та визначити фактори впливу. Окремо проведено аналіз основних методів управління архітектурами КС ОКЗ, методів аналізу архітектур та інформаційних потоків, що призвело до розробки загальних підходів до оптимізації їх архітектур.

Детально досліджено методи рішення задач оптимізації процесів формування та зміни архітектур. Для цього використано алгоритми рішення задач дискретного програмування з метою подальшої розробки методів синтезу і реконфігурації компонент архітектур КСіМ, основною умовою при реалізації яких є наведені обмеження. 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 комп'ютерних мереж (КМ) ОКЗ. 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. Проведено дослідження моделей мережевого трафіку, що використовуються під час аналізу черг. Обґрунтовано вибір узагальненого показника ефективності функціонування КСіМ ОКЗ та сформульовано у загальному вигляді оптимізаційну задачу мінімізації обраного критерію при наявності об'єктивних обмежень, що накладаються характеристиками мережі.

Це дозволило розробити комплекс методів багатопараметричного синтезу архітектур КСіМ ОКЗ, що складається з методу синтезу архітектури КС ОКЗ і методу синтезу архітектури КМ ОКЗ. Перший з них враховує вибір задач компонентами, реалізації алгоритмів та методів розв'язання задач і розподіл задач по компонентах в процесі їх розв'язання. Сформульовано критерій якості і можливі відповідні обмеження. Другий враховує вимоги за доступністю компонент КМ та процес її функціонування в контексті навколишнього середовища за умови можливих впливів. Також дістала подальшого розвитку модель процесу розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ. Її особливість – розбиття глобальної оптимізаційної задачі на окремі підзадачі. Виділено і формалізовано можливі розподіли для допустимих множин задач, що розв'язуються, і доступних компонент КС, що синтезується. Для вибору оптимального рішення для таких розподілів проведено врахування основних характеристик КС, відповідних обмежень і можливих логічних взаємозв'язків.

Сформульовано проблему, що виникає при побудові моделей топологічних структур, які враховують динаміку розвитку конкретних компонент КМ ОКЗ. Розроблено комплекс моделей еволюції архітектур КМ ОКЗ, що складається з математичної моделі процесу еволюції топологічної структури КМ та математичної моделі процесу еволюції архітектури КМ. Перша з них дозволяє проаналізувати процес еволюції топологічної структури КМ протягом фіксованого часового інтервалу, та враховує динаміку розвитку конкретних компонент КМ в залежності від їх типу і призначення. Друга дозволяє виконувати планування еволюції КМ (на рівні архітектури) ОКЗ. Також проведено дослідження деяких мультифрактальних спектрів (саме спектр Хаусдорфа, укрупнений мультифрактальний спектр, спектр Лежандра), які можуть бути використані при дрібномасштабному аналізі процесу та визначено способи їх застосування для моделювання трафіку КМ ОКЗ з урахуванням довгострокової залежності трафікового процесу. Показано можливість застосування мультифрактальних спектрів при фрактальному вейвлет-моделюванні і моделюванні довготривалої залежності трафікового процесу.

Вперше розроблено комплекс методів реконфігурації КМ ОКЗ. Для цього досліджено найбільш значущі фактори, що впливають на пропускну здатність бездротових компонент КМ ОКЗ, а також відповідних методів підвищення ефективності КМ ОКЗ. Виявлено, що пропускну здатність бездротових компонент КМ ОКЗ в значній мірі залежить від методів і алгоритмів передачі інформації, що реалізуються протоколами транспортного рівня. Підвищення ефективності транспортного рівня стека протоколів TCP/IP для таких мереж можливо за рахунок використання інформації інших рівнів стека протоколів, зокрема, службової інформації, що міститься в пакеті, а також врахуванням фрактальності трафіку. Наведено результати імітаційного моделювання протоколів бездротових компонент КМ, а також запропоновано рекомендації і модифікації. 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. Розроблений комплекс методів реконфігурації КМ ОКЗ складається з методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку в бездротових компонентах КМ ОКЗ, методу перерозподілу навантаження базової станції бездротових компонент КМ ОКЗ, методу управління маршрутами передачі інформації у бездротових компонентах КМ ОКЗ та методу перерозподілу пропускної здатності в бездротових компонентах КМ ОКЗ. Перший з них має базується на оцінці значення показника Херста на основі дискретного вейвлет-перетворення, який дозволяє виконувати аналіз в реальному масштабі часу. Зміна інтенсивності трафіку реалізується за рахунок зміни розміру ковзаючого вікна на основі моніторингу потоків інформації на заданому інтервалі часу на вході ділянки бездротових компонент КМ ОКЗ з подальшим аналізом їх статистичних характеристик та класифікацій кожного з них. Метод перерозподілу навантаження базової станції бездротових компонент КМ ОКЗ дозволяє рухомим вузлам з рівним або близьким співвідношенням сигнал-шум перемикатися на менш завантажену базову станцію. Для цього базова станція ініціює подію «хендовер» для більш рівномірного розподілу навантаження від рухомих вузлів між сусідніми базовими станціями в бездротових компонентах КМ ОКЗ. Метод управління маршрутами передачі інформації призводить до зменшення часу передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ за рахунок раціональної маршрутизації службової інформації. Він є адаптивним, оскільки дозволяє регулювати частоту поширення службової інформації маршрутизатором залежно від величини середнього інтервалу між виникненням відмов, розрахованим на основі статистичних даних. Останній з методів розробленого комплексу дозволяє зменшити час передачі інформації в бездротових компонентах КМ ОКЗ. Він ґрунтується на розробленій декомпозиційній моделі фрактального трафіку, що дозволяє враховувати властивості фрактальності інформаційного трафіку і особливості бездротових мереж. Тим самим забезпечується оптимальне

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

Крім того, 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. 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. Проведено дослідження різних підходів до вибору часових шкал, що використовуються при вивченні організації черг сучасних високошвидкісних КМ. Доведено, що експоненційні часові шкали є оптимальними для фрактального трафіку в сенсі узгодження необхідної точності і обчислювальної потужності, необхідної для обчислення апроксимації максимуму. Запропоновано удосконалення методу побудови оптимальних часових шкал для апроксимації значення максимального розміру черги, створеної фрактальним трафіком, який використовує статистичні характеристики трафіку лише на кількох окремих експоненційних часових шкалах. Додатково проведено дослідження необхідної точності і обчислювальної потужності, що вимагається для обчислення апроксимації максимуму. Експерименти показали вплив хвостів розподілів в різних масштабах часу на процес організації черг. Спостерігається, що при негаусовських трафікових сценаріях кореляційна структура (короткострокова і довгострокова) описує поведінку черг недостатньо адекватно. Нарешті, запропоновано метод багатоскального 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. 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. Останнім результатом є удосконалення методу передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ. Його використання дозволяє зменшити час передачі інформації внаслідок реалізації алгоритму зміни розміру ковзаючого вікна протоколу, що згладжує флуктуації останнього і призводить до меншого числа повторних передач пакетів даних, а також обробку події «хендовер».

Наведено результати експериментального дослідження аспектів синтезу і реконфігурації архітектур КСiМ 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. Крім того, 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. Наприкінці наведені найбільш важливі експериментальні дослідження ефективності запропонованих в дисертаційній роботі результатів.

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

*Список публікацій здобувача:*

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. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30662-4>. (SCOPUS).

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. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-5133-3>. (SCOPUS).

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. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7_15). (SCOPUS).

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.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-55595-9>. (SCOPUS).

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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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

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.

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

підход на основі системи менеджмента якості. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* : науково-технічний журнал. 2016. № 5(79). С. 26-32.

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.

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.

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. <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.073>.

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 «ХПІ», 2018. Т. 2, № 1. С. 22-27. <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.

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. <http://dx.doi.org/10.11610/isij>.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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. (SCOPUS).

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. (SCOPUS).

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.

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.

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 Венсент-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. **(SCOPUS)**.

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.

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. **(SCOPUS)**.

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.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

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. <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2017.8024289>. **(SCOPUS)**.



## ABSTRACT

Kovalenko A.A. Models and methods for synthesis and reconfiguration of computer systems and networks architectures of critical application objects. – Manuscript. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty of 05.13.05 – Computer Systems and Components (123 – Computer Engineering). – 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 the problem of increasing of the information exchange process operativity in computer systems (CS) of critical application objects (CAO) on the basis of development of a mathematical apparatus (mathematical models and methods) for the synthesis of new and reconfiguration of existing architectures of computer systems and networks (CSN).

On the basis of modern basic hardware and software analysis of CAO CS, it is formulated general requirements, as well as requirements to their components. The trends of development and existing needs of such CS are determined. This made it possible to formulate requirements for architectures of CAO CS and analyze the features of their information support, basic support and identify the influence factors. Separate analysis is performed: it covered the main methods of managing the architecture of CAO CS and methods of architectures and information flows analysis. Such analysis led to the development of common approaches for architectures optimization.

The methods of optimization tasks solving, which are related to processes of architectures formation and change, are researched in details. To do this, algorithms for discrete programming problems solving were used to further develop the methods of CSN architectures' components synthesis and reconfiguration; the constraints are the main condition for the implementation of them. The conditions for choosing the type of algorithm are determined, depending on the nature of the problem being solved. Examples of algorithms implementation for specific problems of boolean and

combinatorial programming are given. An overview of approaches to choosing time scales for queues analysis and research the possibility of choosing time scales for constructing adequate models of modern traffic has been conducted. The use of such models, in particular, allows studying the dynamics of queues related to active network devices; it is extremely important for the planning and distribution of CAO computer networks (CN) loading. The use of traffic statistical characteristics at a small number of time scales allows expanding the theoretical concepts for critical time scales, which makes this approach applicable to any traffic process, including long-range dependent traffic. The research of network traffic models used during queue analysis was conducted. The choice of the generalized indicator of CAO CSN efficiency is substantiated; the optimization problem for the chosen criterion is formulated in a general form, under objective constraints imposed by the characteristics of the network.

This allowed to develop a complex of methods for multiparameter synthesis of CAO CSN architectures, consisting of a method for CAO CS architecture synthesis and a method for CAO CN architecture synthesis. The first of them takes into account the choice of tasks by components, the implementation of algorithms and methods for solving tasks and the distribution of tasks among the components in the process of their solution. The quality criterion and possible restrictions are formulated. The second takes into account the requirements for the availability of CN components and the process of its operation in a context of the environment, subject to possible impacts. Also, the model of the distribution process for tasks among the components of distributed CAO CS was further developed. Its feature is the breakdown of the global optimization task into individual subtasks. Possible distributions for allowable sets of tasks and available components of the synthesized CS are found and formalized. To select the optimal solution for such distributions, the main characteristics of the CS, the corresponding constraints and possible logical interconnections have been taken into account. The problem that arises when constructing models of topological structures, which take into account the dynamics of the CAO SN specific components development, is formulated. The complex of

evolution models for CAO CN architectures is developed; it consists of a mathematical model of the evolution process for CN topological structure and a mathematical model of the evolution process for CN architecture. The first one allows analyzing the evolution of CN topological structure during a fixed time interval, and takes into account the dynamics of CN specific components development, depending on their type and purpose. The second allows planning the evolution of CAO CN (at the level of architecture). Also, a research of some multifractal spectra (the Hausdorff spectrum, the integrated multifractal spectrum, Legendre spectrum), which can be used in the small-scale analysis of the process, is performed; methods of their application for CAO CN traffic modeling are determined taking into account the long-range dependence of the traffic process. The possibility of using multifractal spectra during fractal wavelet modeling and modeling of the long-range dependence of the traffic process is shown.

For the first time a complex of methods for CAO CN reconfiguration has been developed. For this purpose, the most significant factors influencing the bandwidth of CAO CN wireless components are investigated, as well as appropriate methods for improving the efficiency of CAO CN. It was found out that the bandwidth of CAO CN wireless component depends to a large extent on the methods and algorithms for information transmission implemented by the transport layer protocols. Increasing the transport layer efficiency of the TCP/IP protocol stack for such networks is possible via using the information from other levels of the protocol stack, in particular, the service information contained in the package, as well as taking into account the fractality of traffic. The simulation results of protocols of CN wireless components are presented, as well as recommendations and modifications are proposed. It is shown that the application of the proposed modifications allows achieving an increase in the TCP throughput in wireless components by reducing the time needed to restore the size of congestion window after the packet loss, as well as reducing the packet transmission time in established connection. The developed complex of methods for CAO CN reconfiguration consists of a method for short-term prediction of traffic intensity in CAO CN wireless components, a method for base station load

reallocation in CAO CN wireless components, a method for information transmission routes control in CAO CN wireless components and a method for bandwidth reallocation in CAO CN wireless components. The first of them is based on evaluation of the Hurst index value based on a discrete wavelet transform, which allows real-time analysis. The change in traffic intensity is implemented by changing the size of congestion window on the basis of information flows monitoring at a given time interval at input of the CAO CN wireless components section with a further analysis of their statistical characteristics and classifications of each of them. The method for base station load reallocation in CAO CN wireless components allows the mobile nodes with equal or close signal-to-noise ratios to be switched to a less loaded base station. For this, the base station initiates the "handover" event for a more even allocation of the load from moving nodes between neighboring base stations in CAO CN wireless components. The method for information transmission routes control leads to information transmission time reducing in CAO CN wireless components due to service information efficient routing. It is adaptive, since it allows regulating the frequency of service information generation by a router, depending on the size of the average interval between the occurrence of failures, calculated on the basis of statistical data. The last of the methods of developed complex allows information transmission time reducing in CAO CN wireless components. It is based on the developed decomposition model of fractal traffic, which allows taking into account the properties of information traffic fractality and the features of wireless networks. Thus, the optimal use of allocated bandwidth is provided, which reduces the probability of congestions and accelerates the information transmission.

In addition, a mathematical model for a CAO CN cloud component operation has been improved. Among the most important characteristics of the CN, the average delay of packets between the chosen dedicated pair was selected; such pair typically uses its own temporary virtual channel. In the framework of the model, the problem of minimizing the average delay time with restrictions on total cost of the channels is formulated. To solve it, the rule of Lagrange multipliers is used. Expressions obtained as a result of optimization problem solving allow analyzing the corresponding

characteristics of CAO CN cloud component and can be used both in the synthesis of network topological structure and in the design of its extensions.

Research of various approaches to a choice of time scales used in the study of queues organization in modern high-speed CN has been carried out. It is proved that the exponential time scales are optimal for fractal traffic in terms of matching the required accuracy and computing power required to calculate the maximum approximation. It is proposed a modification of method for optimal time scales constructing; it is intended for approximating the value of queue maximum size, which is created by a fractal traffic. The method uses statistical characteristics of traffic only at several separate exponential time scales. In addition, a study of the precision and computing power required to calculate the maximum approximation has been conducted. Experiments have shown the effect of distribution tails at different time scales on the organization of queues. It is observed that in non-Gaussian traffic scenarios, the correlation structure (short-term and long-term) describes the behavior of queues not adequately. Finally, a method of multiscale modeling is proposed, which is used in the modeling of long-term multifractal traffic. Using the Haar wavelet transform, a special multiplicative wavelet structure and scale factors to ensure positive results, the model provides a fast  $O(N)$ -cascade algorithm for the synthesis of  $N$ -point data sets. Apart from multifractal, the second order statistical properties of the model are analyzed. The scheme, which was obtained for reconciling the model with the results of real data, demonstrates its effectiveness, and the possibility of applying the proposed model to the synthesis of network traffic. Flexibility and accuracy of both models and smoothing procedures lead to close correspondence with the statistical characteristics of real data (graphs of dispersion-time and instant scaling) and queue behavior. Research of exponential time scales, which are used for studying of CAO CN queues organization, is conducted. It is proved that exponential time scales are optimal for fractal traffic in terms of matching the required accuracy and computing power required to calculate the maximum approximation. Applications can accurately approximate the tail probability of the queue using statistical characteristics of the traffic only on several separate

exponential time scales. The final result is the improvement of a method for information transmitting in CAO CN wireless segment. Its application allows reducing the information transmission time due to implementation of the algorithm for changing the size of a protocol congestion window, which smooths the fluctuations of the latter and leads to a smaller number of retransmissions of data packets, as well as handling the "handover" event.

The results of experiments related to the aspects of CAO CSN architectures synthesis and reconfiguration are presented. Thus, it has been experimentally found that consideration of "handover" event in CAO CN wireless components allows for a more even reallocation of bandwidth in different service sets, resulting in significantly smaller number of congestions. In addition, the results of investigation related to security aspects of CAO CN cloud component are presented and a metric, which allows comparison of different security policies has been proposed. Such a metric is universal metric for assessing the security of CAO CN and can be used both in assessing existing CN security policy and in developing promising security policies. The metric can easily be implemented in a case of sufficiently long-term monitoring of network security and availability of appropriate logs. Presence of auxiliary coefficients allows varying the parameters of network security policy. Finally, the most important experimental studies related to effectiveness of the results, which are proposed in the dissertation, are presented.

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

*List of publications:*

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. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30662-4>. (SCOPUS).

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. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-5133-3>. (SCOPUS).

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. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7_15). (SCOPUS).

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. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-55595-9>. (SCOPUS).

5. Kovalenko A.A. Ohlyad modeley trafika, yaki vykorystovuyut'sya pid chas analizu cherh. *Systemy ozbroyennya i viys'kova tekhnika* : naukovyy zhurnal. 2008. № 4(16). P. 130-132.

6. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Asymptoticheskyy analiz ochereyey vysokoskorostnykh telekommunikatsyonnykh setey. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2008. Vyp. 7(74). P. 67-73.

7. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Obzor podkhodov k vyboru vremennykh shkal pri provedenii analiza ochereyey. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2009. Vyp. 1(75). P. 68-71.

8. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Metod postroyennya optymal'nykh vremennykh shkal dlya approksymatsyy znachenyya maksimal'noho razmera ocherey. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl*. Kharkiv : KHUPS, 2009. Vyp. 3(21). P. 93-96.

9. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Mnohoshkal'noe veyvlet-modelyrovanye trafyka mul'tyservysnykh setey. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy* : naukovo-tekhnichnyy zhurnal. 2009. № 6(40). P. 231-239.

10. Kovalenko A.A., Mozhayev O.O., Zavyzystup Y.Y. Analiz povedinky cherh marshrutyzatoriv u merezhakh peredachi informatsiyi v zalezhnosti vid typiv trafiku. *Systemy ozbroynnya i viys'kova tekhnika* : naukovyy zhurnal. 2009. № 2(18). P. 103-105.

11. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Otsenka bezopasnosti mul'tyservysnoy sety. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl*. Kharkiv : KHUPS, 2009. Vyp. 4(22). P. 89-94.

12. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Postroenye eksponentsyal'nykh vremennykh shkal pry analize ocheredey mul'tyservysnykh setey. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy* : naukovo-tekhnichnyy zhurnal. 2010. № 7(48). P. 257-262.

13. Kovalenko A.A., Zavyzystup Y.Y., Mokhammad A.S., Mozhaev M.A. Osobennosti funktsyonyrovannya protokolov v besprovodnykh setyakh. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2010. Vyp. 5(86). P. 39-42.

14. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Zavyzystup Y.Y. Prymenenye mul'tyfraktal'nykh spektrov dlya modelyrovannya trafyka mul'tyservysnykh setey. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Kyiv : DP «TSNDI NiU», 2010. Vyp. 2(14). P. 207-214.

15. Kovalenko A.A., Mokhammad A.S., Zavyzystup Y.Y. Analiz faktorov, vliyyayushchikh na propusknuyu sposobnost' besprovodnykh setey. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Kyiv : DP «TSNDI NiU», 2011. Vyp. 2(18). P. 260-264.

16. Kovalenko A.A., Mokhammad A.S., Zavyzystup Y.Y. Metod pereraspredelenyya nahruzky bazovoy stantsyy v tekhnolohyy WIMAX. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2011. Vyp. 5(95). P. 212-217.

17. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mokhammad A.S. Metod umen'shenyya vremeny peredachy dannykh v besprovodnoy sety. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Kyiv : DP «TSNDI NiU», 2011. Vyp. 3(19). P. 209-213.

18. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mokhammad A.S. Metod pereraspredelenyya propusknoy sposobnosti dlya umen'shenyya vremeny peredachy



dannykh v besprovodnoy sety. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl*. Kharkiv : KHUPS, 2011. Vyp. 3(29). P. 140-145.

19. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mokhammad A.S. Metod parametricheskogo upravleniya peredachey dannykh dlya modifikatsii transportnykh protokolov besprovodnykh setey. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2011. Vyp. 8(98). P. 211-218.

20. Kovalenko A., Kharchenko V., Siora A. GAP- and HTT-based analysis of safety-critical systems. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy : naukovotekhnichnyy zhurnal*. 2012. № 7(59). P. 198-204.

21. Kovalenko A.A., Zavyzstup Y.Y., Kuchuk H.A., Deyneko Z.V. Prediktivnoye upravleniye intensivnost'yu trafika v besprovodnykh setyakh peredachi dannykh. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2013. Vyp. 4(111). P. 123-129.

22. Kovalenko A.A. Podkhody k sintezu informatsionnoy struktury sistemy upravleniya ob'yektom kriticheskogo primeneniya. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2014. Vyp. 1(117). P. 180-184.

23. Kovalenko A.A. Podkhody k sintezu tekhnicheskoy struktury komp'yuternoy sistemy, obrazuyushchey sistemu upravleniya ob'yektom kriticheskogo primeneniya. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl*. Kharkiv : KHUPS, 2014. Vyp. 1(38). P. 116-119.

24. Kovalenko A.A. Podkhody k optimizatsii raspredeleniya zadach upravleniya po komponentam komp'yuternoy sistemy, obrazuyushchey sistemu upravleniya ob'yektom kriticheskogo primeneniya. *Nauka i tekhnika Povitryanikh Sil Zbroynikh Sil Ukrayini : naukovotekhnichnyy zhurnal*. 2014. № 2(15). P. 158-160.

25. Kovalenko A.A., Kuchuk G.A., Yankovskiy A.A. Model' protsessa evolyutsii topologicheskoy struktury komp'yuternoy seti sistemy upravleniya ob'yektom kriticheskogo primeneniya. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2014. Vyp. 7(123). P. 93-96.

26. Kovalenko A.A. Formalizatsiya zadach planirovaniya evolyutsii informatsionnoy struktury komp'yuternoy sistemy, obrazuyushchey sistemu

upravleniya ob'yektom kriticheskogo primeneniya. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2014. Vyp. 9(125). P. 135-137.

27. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Mozhaev A.A. Vybory kombinatornogo algoritma optimizatsii pri upravlenii trafikom mul'tiservisnoy seti. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2015. Vyp. 10(135). P. 97-102.

28. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Vykorystannya metodiv zminy prostoru rishen' dlya optymizatsiyi upravlinnya trafikom mul'tyserveisnykh merezh. *Systemy obrobky informatsiyi*. Kharkiv : KHUPS, 2016. Vyp. 5(142). P. 128-132.

29. Kovalenko A.A., Brezhnev E.V., Yl'yashenko O.A. Obespechennye ynformatsyonnoy bezopasnosty IUS, vazhnykh dlya bezopasnosty: protsessnyy podkhod na osnove systemy menedzhmenta kachestva. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy : naukovo-tekhnichnyy zhurnal*. 2016. № 5(79). P. 26-32.

30. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Optymal'noe upravlenye trafikom mul'tyservysnoy sety na osnove metodov posledovatel'noho uluchshenyia reshenyy. *Systemy ozbroyennya i viys'kova tekhnika : naukovyy zhurnal*. 2016. № 3(47). P. 59-63.

31. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Suchasnyy stan ta tendentsiyi rozvytku komp'yuternykh system ob'yektiv krytychnoho zastosuvannya. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Poltava : PNTU, 2018. Vyp. 1(47). P. 110-113.

32. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Nechausov S.M. Informatsiyni tekhnolohiyi syntezy i rekonfiguratsiyi struktur komp'yuternykh system ob'yektiv krytychnoho zastosuvannya. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Poltava : PNTU, 2018. Vyp. 2(48). P. 73-76. <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2018.2.073>.

33. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Metody syntezy informatsiynoi ta tekhnichnoi struktur systemy upravlinnya ob'yektom krytychnoho zastosuvannya. *Suchasni informatsiyni systemy : naukovo-tekhnichnyy zhurnal*. Kharkiv: NTU «KHPI», 2018. V. 2, № 1. P. 22-27. <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>.

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. <http://dx.doi.org/10.11610/isij>.

35. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Avtomatychnyy kontrol' ta upravlinnya parametry DTZ-trafika komp'yuternykh system krytychnoho pryznachennya. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Poltava : PNTU, 2016. Vyp. 4(40). P. 24-28.

36. Kovalenko A.A., Kuchuk G.A. Metod upravleniya rekonfiguratsiyey informatsionnoy struktury komp'yuternoy sistemy ob'yekta kriticheskogo primeneniya pri vkluyuchenii operativnykh zadach v sistemu upravleniya. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Poltava : PNTU, 2017. Vyp. 1(41). P. 107-110.

37. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A., Lukova-Chuyko N.V. Metod minimizatsiyi seredn'oyi zatrymky paketiv u virtual'nykh z'yednannyakh merezhi pidtrymky khmarnoho servisu. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku*. Poltava : PNTU, 2017. Vyp. 2(42). P. 117-120.

38. Kovalenko A., Kuchuk H., Ruban I. Load distribution of basic stations in mobile communication networks. *Suchasnyy stan naukovykh doslidzhen' ta tekhnolohiy v promyslovosti : naukovo-vyrobnychyy zhurnal*. 2017. № 1 (1). P. 75-81.

39. Kovalenko A.A. Metod postroyeniya optimal'nykh vremennykh shkal dlya approksimatsii kharakteristik ocheredi. *Problemy informatiki i modelirovaniya : Sb. tez. dokl. po mater. 9-y mezhd. nauchno-tekhnicheskoy konf. (26-28 listopada 2009, Kharkiv)*. Kharkov : NTU «KHPI», 2009. P. 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.

41. Kovalenko A.A. Vybory modeley trafyka dlya provedenyya analiza ocheredey. *Informatsiyi tekhnolohiyi v navihatsiyi i upravlinni: stan ta perspektyvy rozvytku : materialy pershoyi mizhnarodnoyi NTK (5-6 lypnya 2010, Kyiv)*. Kyiv : DP «TSNDI NiU», 2010. P. 54.

42. Kovalenko A.A., Zavyzstup Y.Y., Mokhammad A.S. Podkhody k razrobotke metoda pereraspredelenyya propusknoy sposobnosti dlya umen'shenyya vremeny peredachy dannykh v besprovodnykh setyakh. *Suchasni napryamy rozvytku*

*informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy ta zasobiv upravlinnya* : materialy druhoyi mizhnarodnoyi NTK (15-16 hrudnya 2011, Kyiv). Kyiv : DP «TSNDI NiU», 2011. P. 38-39.

43. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Osobennosty funktsyonyrovanyya besprovodnykh komponent v telekommunikatsyionnykh setyakh. *Novitni tekhnolohiyi – dlya zakhystu povitryanoho prostoru* : Sb. tez. dopovidey po mater. 8-yi naukovoyi konferentsiyi Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl im. Ivana Kozheduba (18-19 kvitnya 2012, Kharkiv). Kharkiv : KHUPS, 2012. P. 193.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

46. Kovalenko A.A., Zavyzistup Y.Y., Mokhammad A.S. Podkhody k upravlenyyu trafykom v telekommunikatsyionnykh setyakh. *Informatsiyni problemy teoriiy akustychnykh, radioelektronnykh i telekomunikatsiynykh system* : materialy pershoyi mizhnarodnoyi nauково-tekhnichnoyi konferentsiyi (25-29 veresnya 2012, Alushta). Alushta, Kharkiv : NTU «KHPI», 2012. P. 168.

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.

48. Kovalenko A.A. Podkhody k vyboru y formalyzatsyy parametrov resursov raspredelennykh system. *Problemy informatyzatsiyi* : materialy pershoyi mizhnarodnoyi NTK (19-20 hrudnya 2013, Cherkasy). Cherkasy: CHDTU; Kyiv: DUT; Poltava: PNTU, 2013. P. 28-29.

49. Kovalenko A.A. Syntez tekhnicheskoy struktury komp'yuternoy systemy, obespechivayushchey funktsyonyrovanye systemy upravlenyya krytycheskoho pryomenenyya. *Problemy informatyzatsiyi* : materialy druhoyi mizhnarodnoyi NTK (12-13 kvitnya 2014, Kyiv). Kyiv: DUT; Poltava: PNTU; Katovyts'e: Katovyts'kyy ekonomichnyy universytet; Paryzh: Universytet Paryzh VII Vyensent-Sen-Dyeni, 2014. P. 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. **(SCOPUS)**.

52. Kovalenko A.A., Kuchuk H.A. Analyz podkhodov k modelyrovanyyu protsessa evolyutsyy topolohycheskykh struktur komp'yuternykh setey. *Informatsiyi problemy teoriiy akustychnykh, radioelektronnykh i telekomunikatsiynykh system* : materialy tret'oyi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi (21-23 zhovtnya 2014, Kharkiv). Kharkiv, NTU «KHPI», 2014. P. 42-43.

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. **(SCOPUS)**.

54. Kovalenko A.A., Solovyov D.N. Metod umen'shenyya vremeny peredachy dannykh v besprovodnoy sety tekhnolohyy Wi-Fi. *Suchasni napryamy rozvytku informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy ta zasobiv upravlinnya* : materialy

p'yatoyi mizhnarodnoyi NTK (23-24 kvitnya 2015, Poltava). Poltava: PNTU; Baku: VA ZS AR; Kharkiv: DP «KHNDI TM», 2015. P. 18.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

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. **(SCOPUS)**.

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. <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2017.8024289>. **(SCOPUS)**.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОЇ ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ АРХІТЕКТУР В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....	19
1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку КС ОКЗ.....	19
1.1.1 Базове апаратне забезпечення КС ОКЗ.....	21
1.1.2 Базове програмне забезпечення КС ОКЗ.....	22
1.1.3 Загальні вимоги до КС ОКЗ та їх компонент.....	23
1.1.4 Тенденції розвитку КС ОКЗ.....	26
1.2 Вимоги до архітектур КС ОКЗ.....	27
1.2.1 Особливості КС ОКЗ та їх інформаційного забезпечення.....	27
1.2.2 Вимоги до якості базового забезпечення КС ОКЗ.....	29
1.2.3 Визначення факторів впливу на КС ОКЗ.....	34
1.3 Аналіз основних методів формування архітектур КС ОКЗ.....	36
1.3.1 Загальні підходи до оптимізації архітектур.....	36
1.3.2 Методи аналізу архітектур.....	37
1.3.3 Методи аналізу інформаційних потоків.....	40
Висновки за розділом 1.....	42
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СИНТЕЗУ І РЕКОНФІГУРАЦІЇ АРХІТЕКТУР КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ І МЕРЕЖ.....	44
2.1 Методи рішення задач оптимізації процесів формування та зміни архітектур.....	44
2.1.1 Комбінаторні алгоритми оптимізації.....	45
2.1.2 Методи зміни простору рішень.....	55
2.1.3. Методи послідовного покращення рішень.....	65

2.2 Огляд підходів до вибору часових шкал для проведення аналізу черг.....	74
2.2.1 Дослідження підходів до вибору часових шкал .....	75
2.2.2 Багатошкільні апроксимації при аналізі черг.....	78
2.3 Огляд моделей трафіка, що використовуються під час аналізу черг.....	81
2.4 Вибір критерію оцінки ефективності функціонування КС ОКЗ .....	87
Висновки за розділом 2 .....	91
<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ СИНТЕЗУ АРХІТЕКТУР КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	<b>93</b>
3.1 Метод синтезу архітектури комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування.....	93
3.2 Метод синтезу архітектури комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування.....	101
3.3 Оптимізація розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ .....	107
3.3.1 Підходи до виконання оптимізації .....	107
3.3.2 Математична модель процесу розподілу задач по компонентах комп'ютерної системи .....	109
3.4 Математична модель процесу еволюції топологічної структури комп'ютерної мережі об'єкту критичного застосування .....	112
3.4.1 Математична модель еволюції вузлів комп'ютерної мережі ..	113
3.4.2 Моделювання еволюції транзитних вузлів у комп'ютерній мережі .....	115
3.5 Математична модель процесу еволюції архітектури комп'ютерної мережі .....	119
3.6 Застосування мультифрактальних спектрів при моделюванні трафіку.....	122
3.6.1 Мультифрактальні спектри .....	124
3.6.2 Особливості при моделюванні трафіку .....	131



Висновки за розділом 3 .....	137
<b>РОЗДІЛ 4. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ КОМПОНЕНТ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	
4.1 Аспекти функціонування протоколів у бездротових мережах ..	139
4.2 Особливості передачі інформації в бездротових компонентах	
КМ ОКЗ .....	149
4.3 Імітаційне моделювання протоколів бездротових компонент ...	152
4.4 Короткострокове прогнозування інтенсивності трафіку в бездротових компонентах КМ ОКЗ.....	158
4.4.1 Метод оцінки значення показника Херста на основі дискретного вейвлет-перетворення .....	160
4.4.2 Розробка методу інтелектуального управління інтенсивністю трафіка в бездротових компонентах КМ ОКЗ.....	163
4.5 Метод перерозподілу навантаження базової станції бездротових компонент КМ ОКЗ.....	167
4.5.1 Особливості події «хендовер» .....	168
4.5.2 Особливості події «хендовер» в бездротових компонентах КМ ОКЗ на основі технології IEEE 802.16 .....	169
4.5.3 Удосконалення методу перерозподілу навантаження в бездротових компонентах КМ ОКЗ.....	170
4.6 Метод управління маршрутами передачі інформації у бездротових компонентах КМ ОКЗ.....	173
4.7 Метод перерозподілу пропускної здатності в бездротових компонентах КМ ОКЗ.....	181
Висновки за розділом 4 .....	187
<b>РОЗДІЛ 5. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДТРИМКИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ АРХІТЕКТУР КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	
	190

5.1 Математична модель функціонування хмарної компоненти КМ ОКЗ .....	190
5.2 Метод побудови оптимальних часових шкал для апроксимації значення максимального розміру черги .....	198
5.2.1 Метрика, що характеризує точність .....	200
5.2.2 Оптимальність експоненційних часових шкал .....	202
5.2.3 Похибка максимальної помилки .....	203
5.3 Асимптотичний аналіз черг високошвидкісних КМ ОКЗ .....	205
5.3.1 Асимптотичне дослідження черг .....	206
5.3.2 Вплив розподілу на черги .....	211
5.4 Багатошкільне вейвлет-моделювання процесу передачі інформації у комп'ютерних мережах .....	217
5.4.1 Моделювання процесу передачі інформації у комп'ютерних мережах .....	217
5.4.2 Особливості моделювання процесу передачі інформації у комп'ютерних мережах .....	221
5.5 Побудова експоненційних часових шкал при аналізі черг КМ ОКЗ .....	226
5.6 Метод передачі інформації для модифікації транспортних протоколів бездротового сегменту КМ ОКЗ .....	238
Висновки за розділом 5 .....	248
<b>РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ СИНТЕЗУ І РЕКОНФІГУРАЦІЇ АРХІТЕКТУР КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ І МЕРЕЖ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ .....</b>	
6.1 Схеми послідовності застосування моделей та методів синтезу і реконфігурації архітектур КС ОКЗ .....	250
6.2 Особливості реконфігурації архітектури КС ОКЗ.....	255
6.3 Експериментальне дослідження аспектів реконфігурації бездротових компонент КМ ОКЗ .....	262
6.4 Дослідження аспектів безпеки хмарної компоненти КМ ОКЗ .....	266

6.4.1 Універсальна метрика оцінки політики безпеки .....	266
6.4.2 Оцінка результатів застосування метрики для хмарної компоненти КМ ОКЗ за результатами експериментальних досліджень...	274
6.4.3 Комплексна метрика оцінки безпеки КМ ОКЗ .....	277
6.5 Експериментальне дослідження ефективності запропонованих результатів.....	282
6.5.1 Структура комп'ютерної системи об'єкту критичного застосування, важливої з точки зору безпеки .....	282
6.5.2 Результати застосування комплексу методів синтезу архітектур КСіМ ОКЗ .....	284
6.5.3 Результати застосування моделі процесу розподілу задач по компонентах розподіленої КС ОКЗ.....	285
6.5.4 Результати застосування комплексу методів реконфігурації КМ ОКЗ .....	286
6.5.5 Результати застосування методу передачі інформації у бездротовому сегменті КМ ОКЗ.....	297
Висновки за розділом 6 .....	303
ВИСНОВКИ.....	305
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	308
Додаток А. Список публікацій здобувача .....	344
Додаток Б. Математична декомпозиційна модель фрактального трафіку .....	353
Додаток В. Математична багатошкальна вейвлет-модель мультифрактального трафікового процесу .....	359
Додаток Г. Акти впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи.....	367