

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Соболева Олена Володимирівна

УДК 004.942: 519.876

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ  
СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ  
ТЕРИТОРІАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Безкоровайний Володимир Валентинович, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри системотехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Годлевський Михайло Дмитрович, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри автоматизованих систем управління;

доктор технічних наук, професор Нефьодов Леонід Іванович, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2013 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2013 р.

Виконуючий обов'язки  
вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради

І.В. Гребеннік

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У переліку пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки більшості країн світу основні задачі пов'язані з проектуванням, дослідженням і оптимізацією складних антропогенних об'єктів різної природи. До недавніх пір проектування цілісного об'єкта в єдиному циклі вважалося практично неможливим. Та багаторазове зростання обчислювальних потужностей і розроблені комп'ютеризовані підходи до формалізації об'єктів проектування у вигляді цілих систем роблять цю проблему цілком вирішуваною за прийнятний час. З цією метою використовують системи автоматизованого проектування, які забезпечують на логічному рівні можливості всебічної формалізації уявлень про об'єкт, а на функціональному рівні – доступу до значних обчислювальних потужностей (суперкомп'ютери, *GRID*-технології).

Виходячи з цього, виникає необхідність удосконалення і розвитку засобів математичного та програмного забезпечення для автоматизації проектування складних антропогенних об'єктів. При цьому елементи багатьох технічних, технологічних і соціально-економічних об'єктів моніторингу, транспорту, зв'язку, виробництва і збуту продукції, як правило, розосереджені на великих територіях. Це вимагає в процесі їх проектування, планування розвитку та реінжинірингу враховувати топологічні аспекти, що істотно підвищує складність прийняття обґрунтованих проектних й управлінських рішень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є результатом досліджень автора, проведених у Харківському національному університеті радіоелектроніки у період з 2003 по 2012 рік у рамках держбюджетних тем Міністерства освіти і науки, молоді, та спорту України: за темою № 165-2 «Розробка математичних моделей, методів і алгоритмів вирішення завдань реінжинірингу територіально розподілених систем» (№ ГР 0103U001564); за темою № 196-2 «Розробка математичних моделей і методів системного структурно-топологічного синтезу регіональних територіально розподілених об'єктів» (№ ГР 0106U003175); за темою № 254-2 «Структурний синтез територіально розподілених об'єктів в умовах неповної визначеності даних» (№ ГР 01116U002624). Здобувач брала участь у виконанні робіт за вказаними темами як виконавець і розробила математичні моделі, методи, алгоритми та програмний засіб для багатокритеріального структурного синтезу і оптимізації централізованих територіально розподілених систем з урахуванням динаміки їх функціонування.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка ефективних математичних моделей, методів, алгоритмів та програмного забезпечення для багатокритеріального синтезу ієрархічних територіально розподілених систем та розв'язання на цій основі важливої науково-практичної задачі підвищення ефективності систем автоматизації проектування територіально розподілених об'єктів.

Задля досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

– провести огляд сучасного стану проблеми автоматизованого проекту-

вання територіально розподілених об'єктів, виконати аналіз існуючих методів їх структурно-топологічної оптимізації, моделей та методів аналізу їх динаміки, багатокритеріального оцінювання та вибору проектних рішень;

– удосконалити системологічну модель загальної задачі структурного синтезу територіально розподілених об'єктів, що дозволить отримувати рішення за множиною функціонально-вартісних критеріїв з урахуванням динамічних характеристик об'єктів;

– розробити комплекс ефективних за показниками точності та складності методів розв'язання задач великої розмірності для багатокритеріального синтезу територіально розподілених об'єктів;

– розробити математичну модель територіально розподіленої сервісної системи, що дозволяє на етапі її проектування аналізувати її стійкість до змін попиту на обслуговування;

– на основі запропонованих моделей та методів розробити алгоритми й програмне забезпечення розв'язання задачі багатокритеріального синтезу територіально розподілених систем для автоматизованої технології їх проектування;

– провести експериментальне дослідження ефективності та практичну апробацію отриманих теоретичних результатів.

*Об'єктом дослідження є територіально розподілені об'єкти.*

*Предмет дослідження – математичні моделі та методи багатокритеріального синтезу територіально розподілених об'єктів.*

*Методи дослідження базуються на теорії множин та системному підході, що дозволили виконати системологічний аналіз проблеми проектування; теорії графів, використаній при доведенні стверджень щодо топологічних структур об'єктів, що проектуються; теорії автоматичного керування та методології системної динаміки, що дозволили виконати функціонально-вартісний аналіз об'єктів проектування; теорії корисності, що забезпечила методи багатокритеріального оцінювання проектних варіантів; методах статистичної обробки, що дозволили оцінити достовірність отриманих теоретичних результатів.*

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат дисертації полягає в розробці ефективних математичних моделей та методів для структурно-топологічної оптимізації централізованих територіально розподілених систем та розв'язання на цій основі важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності систем автоматизації проектування територіально розподілених об'єктів.

При цьому були отримані наступні нові наукові результати:

– отримала подальший розвиток системологічна модель загальної задачі структурного синтезу територіально розподілених об'єктів, яка дозволяє отримувати рішення за множиною функціонально-вартісних критеріїв, у частині урахування динамічних характеристик об'єктів, що дозволяє отримувати більш обґрунтовані рішення та на цій основі підвищити ефективність технологій їх проектування;

– уперше виявлена характерна особливість оптимальних структур ієрархічних територіально розподілених об'єктів, на основі якої запропоновано ев-

ристику, що дозволяє суттєво скоротити кількість варіантів, що аналізуються в процесі їх проектування;

– удосконалено у напрямку зниження часової складності комбінаторний метод та метод покоординатної структурно-топологічної оптимізації ієрархічних територіально-розподілених об'єктів з нерегулярним та регулярним розміщенням їх елементів, що дозволяє за прийнятний час розв'язувати практичні задачі більшої розмірності;

– уперше на основі методології системної динаміки розроблено модель трирівневої територіально розподіленої сервісної системи, що дозволяє на етапі проектування аналізувати її стійкість до змін попиту на обслуговування;

– запропоновано модифікації функцій гіперболічного тангенсу та Гауса для оцінки корисності проектних рішень за частковими критеріями, що дозволяють розширити можливості формалізації переваг особи, що приймає рішення, та частіше за базові функції відтворюють її переваги;

– уперше запропоновано моделі оцінки узагальненої корисності проектних рішень на основі експоненціальної функції, функції інформаційної ентропії, адитивно-мультиплікативної функції та функції на основі поліному Колмогорова-Габора, що дозволяють відтворювати порядок переваг особи, що приймає рішення, частіше, ніж з використанням базових моделей.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені математичні моделі та методи багатокритеріального синтезу топологічних структур розвивають методологічну основу для створення ефективних інструментальних засобів систем підтримки прийняття рішень у сучасних технологіях автоматизованого проектування територіально розподілених об'єктів.

Практичне значення результатів підтверджується їх впровадженням. Результати дисертаційної роботи впроваджені: у держбюджетні науково-дослідні роботи, що виконано згідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки, що фінансуються за рахунок Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України; у навчальному процесі на кафедрі системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки; реалізовані на практиці при реінжинірингу системи постачання ДПП «Книжковий клуб «Клуб Сімейного Дозвілля»; у ТОВ «Наукововиробниче об'єднання «Політех».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто та опубліковані у роботах [1 – 18]. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: в [1] – модифікація методу направленої перебору для оптимізації топології систем з радіально-вузловими структурами; в [2] – евристична процедура для методів оптимізації топології систем з радіально-вузловими структурами; в [3] – модифікація методу направленої перебору для оптимізації топології систем з регулярним розміщенням елементів; в [4, 13] – функції корисності часткового критерію у вигляді модифікованого гіперболічного тангенсу та модифікованої функції Гауса;

в [5] – модифікації критеріїв узагальненої корисності (у вигляді суми експонент, у вигляді функції, побудованої на основі інформаційної ентропії, модифікація адитивно-мультиплікативного критерію узагальненої корисності, модифікація критерію узагальненої корисності у вигляді поліному Колмогорова-Габора); в [6, 8, 15–16] – модель динаміки трирівневої територіально розподіленої сервісної системи; в [7] – композиційна модель задачі структурного синтезу територіально розподілених систем.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи були апробовані на конференціях, форумах та семінарах: міжнародній науковій конференції «Теорія і техніка передачі, прийому та обробки інформації» (Харків, 2003) [8], 10-му і 13-му міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ ст.» (Харків, 2006, 2009) [9, 10], 14-й Всеросійській міжвузівській науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Мікроелектроніка та інформатика – 2007» (Москва, 2007) [11], 2-й міжнародній конференції «Сучасні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку» (Харків, 2007) [12], 4-й науковій конференції Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба (Харків, 2008) [13], 2-й науково-практичній молодіжній школі-семінарі студентів, аспірантів та молодих учених «Інформаційні інтелектуальні системи – 2009» (Харків, 2009) [14], 12-й всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій» (Одеса, 2012) [15], 11-й всеукраїнській науково-технічній конференції «Математичне моделювання та інформаційні технології» (Одеса, 2012) [16], 12-й та 14-й міжнародних науково-практичних конференціях «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2010, 2012) [17, 18].

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 18 друкованих працях, у тому числі у 7 статтях у періодичних виданнях, включених до переліків спеціалізованих наукових видань України, та у 11 доповідях на міжнародних, Всеукраїнських та регіональних наукових конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел зі 186 найменувань (20 стор.), 1 додатку (4 стор.), її повний обсяг становить 205 сторінок, у тому числі 55 рисунків (32 стор.), 23 таблиці (14 стор.).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дослідження та необхідність розробки математичних моделей, методів, алгоритмів для багатокритеріального синтезу ієрархічних територіально розподілених систем; сформульовані мета, задачі, об'єкт, предмет дослідження, наукова новизна та практична цінність роботи; названі методи дослідження; наведено декларацію особистого внеску здобувача у публікаціях зі співавторами, відомості про апробацію результатів і публікації за темою дисертації.

**Перший розділ** роботи присвячено огляду й аналізу сучасного стану

проблеми проектування територіально розподілених об'єктів. У ньому виділені особливості територіально розподілених об'єктів, як об'єктів автоматизованого проектування, виконано аналіз процесів їх автоматизованого проектування, а також аналіз існуючих математичних моделей і методів їх структурно-топологічної оптимізації.

На основі огляду публікацій за темою дослідження було встановлено, що існуюча методологія багатофакторного структурно-топологічного синтезу територіально розподілених систем транспорту, зв'язку, моніторингу, управління, виробництва і збуту продукції, обслуговування дозволила автоматизувати основні етапи процесів їх системного проектування та управління. Разом з тим, необхідність раціонального використання ресурсів, накопичений досвід вирішення задач синтезу, розвиток інтелектуальних технологій та засобів обчислювальної техніки вимагають постановки нових завдань розвитку і вдосконалення методології та інструментарію для оптимізації територіально розподілених об'єктів. Зокрема, виникає необхідність постановки та вирішення комплексних завдань багатокритеріального синтезу територіально розподілених об'єктів з урахуванням їх динамічних властивостей.

Основні результати розділу опубліковані в [1 – 7].

У **другому розділі** переглянуто методологічні основи проектування територіально розподілених об'єктів. Проведений аналіз понять «середовище – структура – система» дозволив сформулювати їх зв'язок із категоріями цілісності. Зроблено висновок, що ступінь цілісності визначається об'єктивізацією меж існування сутності, що розглядається. Відокремлено принципи організації середовищ (структуроутворюючі) від принципів організації систем (системоутворюючі). Сформульовано ієрархію системутворюючих принципів та наведено формальне подання об'єктів у залежності від рівня їх пізнання. Маловивчений об'єкт можна подати у такому вигляді, коли принципи організації задані неявно за допомогою визначення меж його існування:

$$S = \langle E, R, \bar{s} \rangle,$$

де  $S$  – система;  $E$  – множина елементів;  $R$  – множина відношень (зв'язків) між елементами;  $\bar{s}$  – зовнішнє середовище (зовнішня структура).

Принципи організації добре вивченого об'єкта можуть бути задані явно:

$$S = O_{\pi}(E, R),$$

де  $O_{\pi}$  – оператор організації об'єкта відповідно до принципів  $\pi$ .

Територіально розподілені об'єкти можна формалізувати у вигляді:

$$S = O_{\pi}(E_{ABG}, R_{ABG}), \quad (1)$$

де  $E_{ABG}$  – множина елементів із характеристиками, що відповідають технології  $A$ , із параметрами  $B$  та територіально розподілені відповідно до топології  $G$ ;  $R_{ABG}$  – множина відношень між елементами, що реалізовані за технологією, параметрами та топологією відповідно до  $A, B, G$ .

Згідно до формального подання територіально розподілених об'єктів (1) оновлено формальний запис ієрархії задач *Task* проблеми їх структурного синтезу *MetaTask*:

$$MetaTak = \{ Task_{i=1..5}^1 = \{ Task_{j=1..6}^2 \} \},$$

де задачі макрорівня є задачами проектування та відрізняються обмеженнями, які відображають особливості етапів життєвого циклу територіально розподілених систем (TPC):  $Task_1^1$  – формування вимог до TPC та розробка технічного завдання на проектування;  $Task_2^1$  – системне проектування TPC;  $Task_3^1$  – планування розвитку TPC;  $Task_4^1$  – структурна адаптація TPC;  $Task_5^1$  – реінжиніринг TPC. Задачі мікрорівня пов'язані із розв'язанням питань системного проектування TPC:  $Task_1^2$  – визначення принципів побудови;  $Task_2^2$  – вибір структури;  $Task_3^2$  – визначення топології;  $Task_4^2$  – вибір технології;  $Task_5^2$  – визначення параметрів елементів та зв'язків;  $Task_6^2$  – визначення ефективності варіантів побудови TPC та вибору найкращого серед них.

На основі аналізу взаємозв'язків задач за вхідними та вихідними даними схему проектування TPC подано у вигляді цільової діаграми (рис. 1).

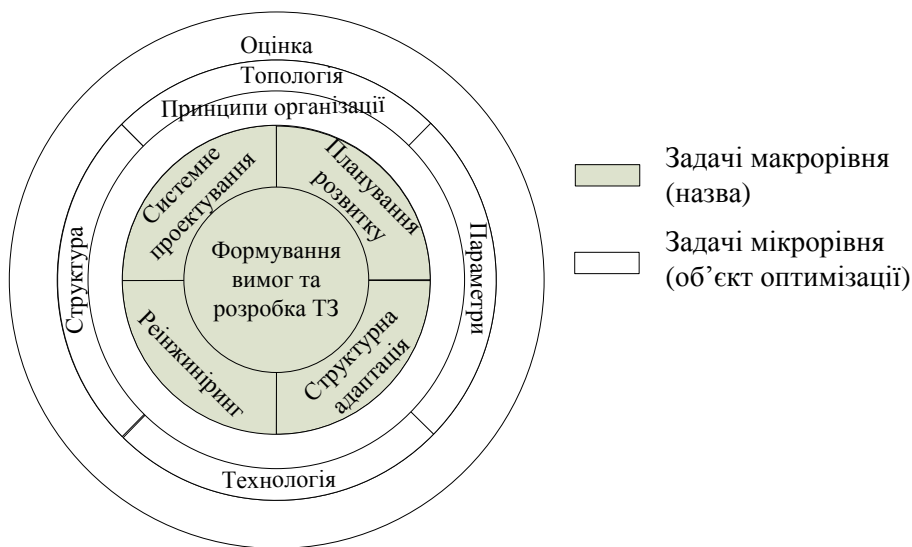


Рисунок 1 – Композиційна схема проблеми структурного синтезу

Людина та/або машина (*Processor*), що вирішують задачу на своєму рівні ієрархії та відповідному рівні декомпозиції системи, у якості вхідних даних можуть мати обмежену частину вхідних даних загальної задачі та не мати доступу до інформації про сам об'єкт, що проектується, працюючи з моделлю (формалізованою у будь-якому вигляді). При цьому виконавці можуть мати різні права доступу як до об'єкта, що синтезується, так і до його моделі чи до технічної документації (рис. 2).



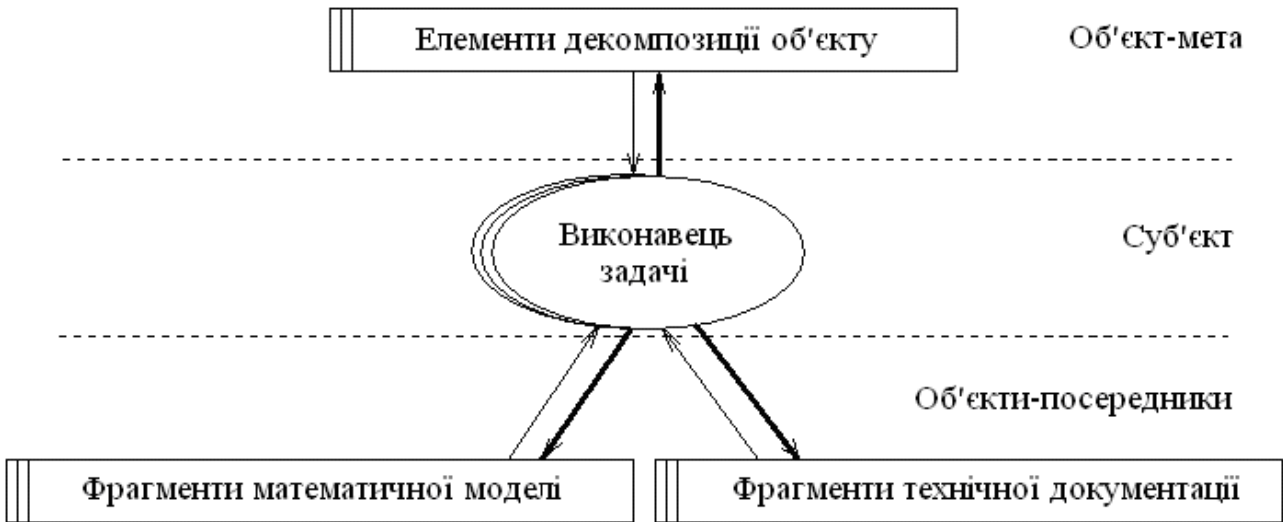


Рисунок 2 – Інформаційна взаємодія об'єкта та суб'єкта проектування:

- – виконавець має доступ до вивчення (аналізу);
- ←— – виконавець має права керування (редагування)

Задачу, що знаходиться у стані розв'язання, як самостійний проект, можна подати у вигляді:

$$TaskInProcess = \langle Timing, Task, Processor \rangle,$$

де *Timing* – набір даних, що включає значення поточного часу, інформацію про можливі та дійсні дати початку й закінчення виконання;  $Task : In \rightarrow Out$  – задача, що розв'язується, вхідні й вихідні дані якої подано у розрізі *Timing*;  $Processor = \{ID, Mission, Permission\}$  – набір ідентифікаційних даних для множини виконавців із зазначенням їх обов'язків, прав у рамках виконання проекту, які також подано в розрізі *Timing*.

З метою врахування динамічних характеристик об'єкта доцільно синтезувати відповідну модель. Суть налагодження моделі системної динаміки при розв'язанні задач макрорівня полягає в такому:  $Task_1^1$  – визначення вимог до структури моделі об'єкта, що проектується;  $Task_2^1$  – доповнення моделі переліком параметрів і законів регулювання (кінетично еквівалентних правилами функціонування об'єкта, що проектується);  $Task_3^1$  – моделювання зі зміненими параметрами або параметрами, що динамічно змінюються;  $Task_4^1$  – введення до моделі змінних, що відображають нові зовнішні умови функціонування об'єкта та моделювання з оптимізацією параметрів моделі;  $Task_5^1$  – оптимізація параметрів моделі, законів регулювання та структури моделі.

Суть налагодження моделі системної динаміки при розв'язанні задач мікрорівня полягає в такому:  $Task_1^2$  – визначення структури моделі об'єкта, що проектується;  $Task_2^2$  – доповнення моделі ідентифікованими параметрами і уточненими законами регулювання;  $Task_3^2$  – ідентифікація транспортних запіз-

нювань;  $Task_4^2$  – уточнення точок витоку та стоку потоків інформації та ресурсів;  $Task_5^2$  – ідентифікація параметрів організаційних запізнювань;  $Task_6^2$  – введення до моделі додаткових змінних, які відповідають критеріям оптимізації, здійснення оптимізації.

Задача структурно-топологічної оптимізації ТРС є частиною задачі її синтезу  $Task_2^2$  і може бути подана у вигляді:

$$Task_2^2 : \{ ObjS, K, Q^*, C^*, S^* \} \rightarrow \{ s_G^* = \langle E_G^*, R_G^* \rangle, K(s_G^*) \}. \quad (2)$$

де  $ObjS$  (от *Object of Service*) – множина характеристик об'єктів, для обслуговування яких створюється система;  $K$  – множина критеріїв для оцінки та вибору варіантів побудови ТРС;  $Q^*$  – набір вимог до якості системи (у тому числі до динамічних характеристик);  $C^*$  – набір вимог до вартісних характеристик;  $S^*$  – множина допустимих варіантів побудови ТРС відповідно до обраних принципів;  $s_G^*$  – топологічна структура.

Основні результати розділу опубліковані в [1, 2, 3, 6, 7].

**Третій розділ** присвячено підвищенню ефективності методів структурно-топологічної оптимізації: визначена особливість ієрархічних топологічних структур, оптимальних за критерієм мінімуму приведених витрат, на основі якої запропоновано процедури скорочення часу та зменшення складності розв'язання задачі структурно-топологічної оптимізації, запропоновано методи структурно-топологічної оптимізації для систем з регулярним та нерегулярним розміщенням елементів по території, наведено результати експериментального дослідження запропонованих методів у порівнянні з базовими методами.

Задача структурно-топологічного синтезу розглядається у такій постановці. Задано: множина розосереджених на території елементів системи  $El = \{ el_i \}, i = \overline{1, n_E}$  та їх характеристики, типи вузлів і зв'язків, на базі яких створюється система, місце розташування центрального елемента, місця можливого розміщення вузлів на множині елементів системи, основні положення технології функціонування. Передбачається, що в системі використовуються такі типи вузлів і зв'язків, що їх ресурсів достатньо для обслуговування елементів, елементи підключаються лише до одного з вузлів, а вузли не з'єднуються між собою безпосередньо. Необхідно визначити оптимальну кількість вузлів (підсистем)  $n_U^o$ ; визначити місця найвигіднішого розташування вузлів; визначити множини елементів, безпосередньо зв'язаних із кожним із вузлів  $El = \{ el_j \}, j = \overline{1, n_U^o}$ .

У переважній більшості задач синтезу й оптимізації ТРС єдиним або основним критерієм є витрати на її створення та/або експлуатацію, що є сумою витрат на її центр  $C_C$ , вузли  $C_U$ , елементи  $C_E$ , зв'язки між вузлами й центром  $C_{UC}$ , зв'язки між елементами й вузлами  $C_{EU}$ :

$$C = C_C + C_U + C_E + C_{UC} + C_{EU} \rightarrow \min.$$

Для ієрархічних топологічних структур, оптимальних за критерієм мінімуму витрат, встановлено, що на базі двох взаємно найближчих елементів одночасно не можуть створюватися вузли: якщо один з них є вузлом, то інший належить до множини зв'язаних з ним елементів (рис.3)

$$(el_{i^o}, el_{j^o}), i^o = \arg \min_i c_{i,j^o}, j^o = \arg \min_j c_{i^o,j}, i^o \neq j^o \neq 1, \quad (5)$$

$$y_{i^o} \in Y \rightarrow el_{j^o} \in El_{i^o}.$$

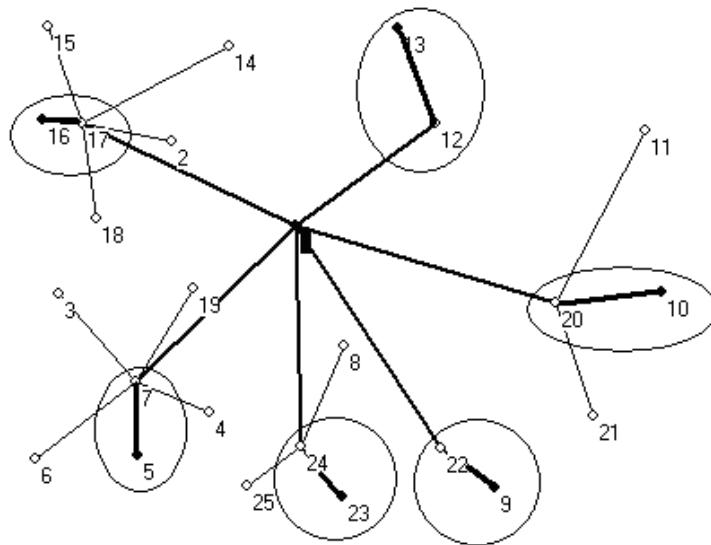


Рисунок 3 – Взаємно найближчі елементи в оптимальній топологічній структурі ієрархічної ТРС

Тобто якщо у місці розташування елемента, що належить до одної з таких пар, розміщено вузол, то не потрібно розглядати усі варіанти топологічних структур, коли є вузлом того ж рівня ієрархії інший елемент, що належить до цієї ж пари. З урахуванням цього запропоновано модифікації методів структурно-топологічної оптимізації: спрямованого перебору для систем з нерегулярним розміщенням елементів; спрямованого перебору для систем з регулярним розміщенням елементів; покоординатної оптимізації.

За результатами 500 тисяч експериментів для систем з кількістю елементів  $n_E = 20$  (що формувалися автоматично з використанням генератора випадкових чисел), методом спрямованого перебору з вбудованою процедурою скорочення варіантів отримано оптимальний варіант структури ТРС у 99,6% випадків. При цьому похибка склала: менше 1% у 0,36% експериментів; менше 2% – у 0,034% експериментів. Скорочення кількості варіантів, що розглядаються під час пошуку, має майже пряму залежність від кількості пар елементів (5) та пряму залежність від кількості вузлів. Середній виграш часу склав 27,62%, середній виграш за кількістю розглянутих варіантів – 34,76%.

Для спрощеної модифікації методу (коли у (5) знімається вимога взаємної

близькості, та розглядаються впорядковані пари «елемент – найближчий до нього елемент») було проведено 100 тисяч експериментів для  $n_E = 20$ . Ймовірність отримання оптимального рішення склала 97,89%; похибка менша за 1% у 1,89% експериментів; похибка менша 2% – у 0,21% експериментів. Середній виграш у часі склав 45,65%, а за кількістю розглянутих варіантів – 47,83%.

У системах з регулярним розміщенням для кожного з елементів можна виділити більше взаємно альтернативних (у сенсі розміщення вузла) елементів: для решітчастих структур до 8 на площині, до 26 в об'ємі, для гексагональних – до 6 на площині, до 12 в об'ємі. Тобто у метод структурно-топологічної оптимізації таких систем достатньо додати перевірку, чи не знаходиться потенційний вузол у найближчій околі до одного з закріплених в структурі вузлів. У проведених експериментах точним методом та запропонованою його модифікацією були отримані однакові рішення, та зроблено висновок, що для симетричних регулярних структур запропонована модифікація методу є точною. Результати експериментів для двовимірних симетричних регулярних структур наведено у табл. 1, 2 (технічні умови дослідження: персональний комп'ютер із процесором *IntelCore Q6600*, тактова частота 2,6 ГГц).

Таблиця 1 – Експерименти для решітчастих регулярних структур

$n_E$	$n_U^o$	Базовий метод		Запропонована модифікація	
		Час рішення	Кількість переглянутих варіантів	Час рішення	Кількість переглянутих варіантів
25	8	2,593 с	2 579 129	0,344 с	286 860
49	8	1 год. 24 хв. 28 с	2 142 281 574	2 хв. 59,953 с	71 692 768

Таблиця 2 – Експерименти для гексагональних регулярних структур

$n_E$	$n_U^o$	Базовий метод		Запропонована модифікація	
		Час рішення	Кількість переглянутих варіантів	Час рішення	Кількість переглянутих варіантів
19	6	0,063 с	63 003	0,016 с	15 833
37	6	17,640 с	10 739 175	2,422 с	1 394 923
61	10	–	435 878 172 348	3 год. 2 хв. 13 с	3 038 406 229

Запропонована ідея скорочення пошуку може бути вбудована у будь-який метод структурно-топологічної оптимізації. У роботі було досліджено ефективність її використання для модифікації методу покоординатної оптимізації (одного з найшвидших методів) у порівнянні відносно базового методу з іншими відомими його модифікаціями: *Mod1*, коли пошук нового місця розміщення поточного вузла здійснюється на множині елементів, що знаходяться на заданій відстані від нього (0,38 від максимальної відстані між елементами); *Mod2*, коли пошук нового місця розміщення поточного вузла здійснюється на множині приєднаних до нього елементів. Порівняння ефективності модифікацій для  $n_E=100$  (100 експериментів) наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Порівняння модифікацій методу покоординатної оптимізації

Показник	<i>Mod1</i>	<i>Mod2</i>	Запропонована модифікація
Середнє скорочення кількості варіантів, що переглядаються під час пошуку, %	15,82	55,58	7,10
Середнє скорочення часу пошуку, %	20,25	52,20	6,8
Ймовірність отримання рішення, гіршого за рішення, отримане базовим методом	0,78	0,81	0
Максимальна похибка критерію оптимізації, %	3,74	1,51	0
Середня похибка критерію оптимізації, %	0,49	0,34	–

Дослідження підтверджують ефективність застосування запропонованих методів на практиці. Основні результати розділу опубліковані в [8, 9, 12, 15].

У **четвертому розділі** на основі методології системної динаміки запропоновано модель динаміки функціонування трирівневої централізованої сервісної системи зі змінною кількістю рухомих (або нерухомих) ресурсів обслуговування. Всю множину елементів системи, вузлів та центру подано трьома агрегованими ланками: центральною ланкою (ЛЦ), ланкою вузлів (ЛВ) та ланкою елементів (ЛЕ). Територіальна розподіленість об'єктів обслуговування врахована значеннями параметрів показникових запізнень, що відображають час пересилання заявок і час переміщення ресурсів обслуговування.

Модель складається з діаграми потоків та системи з 79 рівнянь. Її працездатність перевірено на прикладі аналізу перехідного процесу темпів надходження замовлень на ресурси, інтенсивності обслуговування, обсягів невиконаних замовлень, часу виконання замовлень і фактично доступних для обслуговування ресурсів при відносно швидкій зміні попиту на обслуговування.

Основні результати розділу опубліковані в [6, 8, 11, 15].

У **п'ятому розділі** для розв'язання багатокритеріальних задач синтезу систем запропоновано критерії, що враховують динаміку їх функціонування, а також нові функції корисності часткових критеріїв (ФКЧК) на основі функції Гауса та гіперболічного тангенсу, вільні від недоліків, властивих канонічним функціям.

Запропонована ФКЧК на основі функції Гауса має вигляд:

$$\xi(x) = e^{-\frac{(\bar{x}-a)^{2\alpha}}{b}}, \quad (6)$$

де  $\bar{x}$  – нормоване значення часткового критерію  $x$ ;  $a, b, \alpha$  – параметри,  $\alpha$  параметр, що визначає ступінь випуклості функції.

Запропонована ФКЧК на основі гіперболічного тангенсу, окрім традиційних властивостей, враховує також особливості задач цільової оптимізації із несиметричною корисністю наближення до мети (рис. 4):

$$\xi(x, \alpha, \beta) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^{\alpha \cdot x} + e^{-\beta \cdot x}}, \quad (7)$$

де параметри  $\alpha, \beta \geq 1$  практично незалежно впливають окремо на ліву та

праву частину графіку функції (відносно точки перегину) або окремо відповідають за опуклість та угнутість функції після операції масштабування (рис. 4).

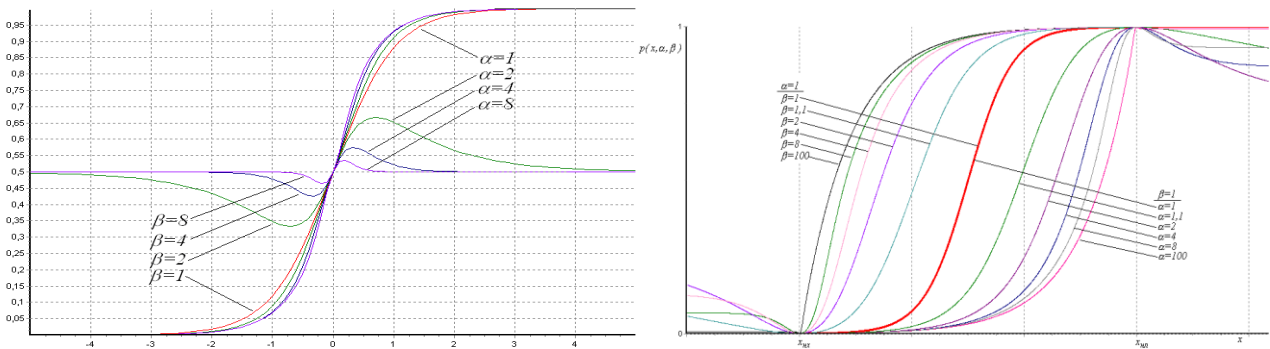
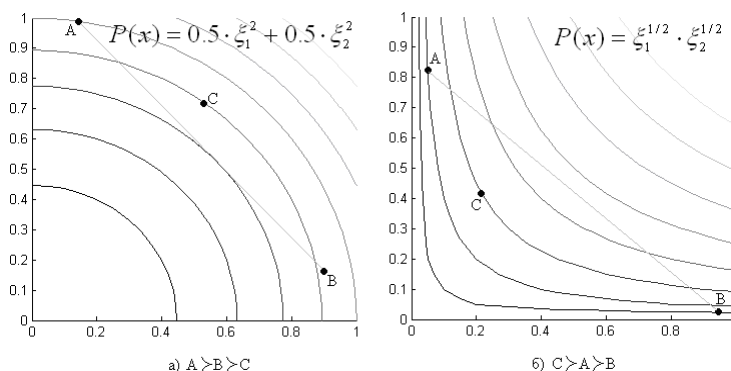


Рисунок 4 – Модифікований гіперболічний тангенс (до та після операції масштабування відносно точок мінімуму та максимуму)

Наведено результати експериментального дослідження точності та складності апроксимації таблично заданої функції корисності шляхом ідентифікації параметрів запропонованих ФКЧК у порівнянні з відомими моделями. ФКЧК у порядку зростання складності ідентифікації за результатами експериментів (з однаковою кількістю кроків для кожного параметру): функція Гауса, запропонована модифікація функції Гауса, логістична функція, запропонований модифікований гіперболічний тангенс, функція Харінгтона, функція-склейка двох ступеневих. ФКЧК у порядку зростання точності ідентифікації: (з однаковою кількістю комбінацій параметрів) запропонований модифікований гіперболічний тангенс, логістична функція, запропонована модифікація функції Гауса, функція Гауса, функція Харінгтона, функція-склейка двох ступеневих функцій.

Проведено аналіз відомих узагальнюючих критеріїв, на основі якого розмежовано можливість їх використання у задачах ідентифікації вибору в залежності від вхідних даних. У разі, коли домінований варіант знаходиться в просторі часткових критеріїв далі від початку координат, ніж гіперплощина, що проходить через домінуючі (рис.5, а), то ситуація вибору може бути ідентифікована моделлю у вигляді поліному Колмогорова-Габора (причому, виняткову роль у цьому відіграють члени зі ступенем більше одиниці). А у випадку, коли кращий варіант знаходиться в просторі часткових критеріїв ближче до початку координат (рис.5, б), то ситуація вибору може бути ідентифікована виключно мультиплікативною складовою моделей узагальненої корисності.



Нанесено лінії рівня моделей оцінки узагальненої корисності у просторі корисності двох часткових критеріїв

Рисунок 5 – Варіанти ситуацій вибору

На адекватність моделі оцінки узагальненої корисності впливає топологія альтернатив вибору в просторі часткових критеріїв – опуклість або увігнутість області Парето щодо кожної пари координат. Ситуація вибору у разі опуклості або угнутості області Парето може бути ідентифікована незбіжними класами узагальнюючих критеріїв, тому актуальним є пошук критеріїв узагальненої корисності, що мають мінімальну кількість параметрів, і в той же час дозволяють охопити більш широкий спектр задач.

Для багатofакторного оцінювання проектних рішень запропоновано нові узагальнюючі критерії. Експонентний узагальнюючий критерій:

$$P(x) = \sum_{i=1..m} (1 - e^{-\lambda_i \xi_i(x)}). \quad (8)$$

де  $m$  – кількість часткових критеріїв;  $\lambda_i$  – їх вагові коефіцієнти.

Функція узагальненої корисності, як інформаційна ентропія:

$$P(x) = \sum_{i=1..m} \lambda_i \cdot \xi_i(x)^{\lambda_i}. \quad (9)$$

Модифікація адитивно-мультиплікативної (АМ) узагальненої корисності:

$$P(x) = a \cdot \sum_{i=1..m} \lambda_i \xi_i(x) + b \cdot \prod_{i=1..m} \xi_i(x)^{\lambda_i} + (1 - a - b) \cdot \prod_{i=1..m} \xi_i(x)^{1/\lambda_i}. \quad (10)$$

де  $a, b \leq 1$ ,  $a + b \leq 1$  – параметри.

Спрощена модифікація узагальнюючого критерію, побудованого у вигляді поліному Колмогорова-Габора (ПКГ):

$$P(x) = \sum_{i=1..m} [\lambda_{1,i} \xi_i(x) + \lambda_{2,i} \xi_i(x)^2 + \lambda_{3,i} \xi_i(x)^{1/2}]. \quad (11)$$

Графічне зображення поверхонь запропонованих моделей узагальненої корисності подано на рис. 6 (для двох часткових критеріїв).

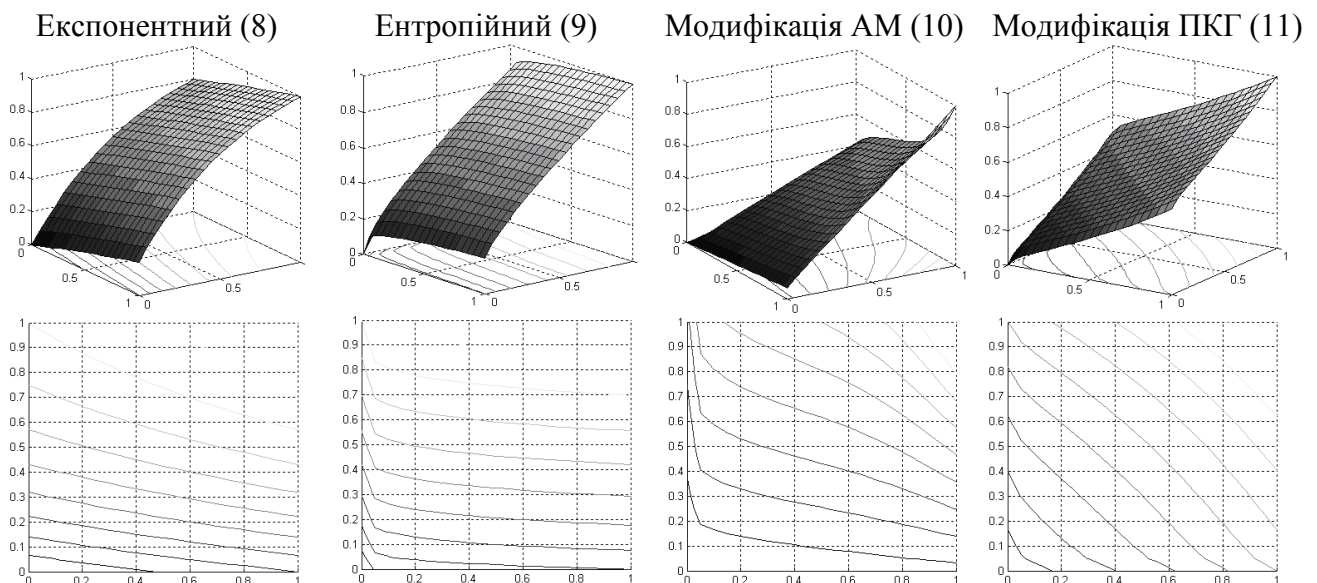


Рисунок 6 – Запропоновані моделі оцінки узагальненої корисності

Експериментальним шляхом отримано оцінки точності і складності запропонованих моделей у порівнянні з відомими. Пошук значень параметрів за технологією компараторної ідентифікації здійснювався різними методами (результати для методу «покоординатного спуску» наведено у табл. 4). Вибір особи, що приймає рішення, задавався фіксованою множиною відношень строгої переваги  $B = \{(x_1, x_2), (x_2, x_3), (x_3, x_4), (x_4, x_5), (x_5, x_6)\}$ , шість альтернатив, заданих на множині Парето, генерувалися випадково. Критерій ідентифікації –  $D = \max_{h=1..Card(B)} [P(A, x_2^h) - P(A, x_1^h)] \rightarrow \min$  (де  $A = \{\lambda_{l=1..m}\} \cup d\lambda$  – множина вагових коефіцієнтів та додаткових параметрів);  $t$  – час;  $W$  – кількість експериментів, коли узагальнюючий критерій виявився найкращим за  $K$ ;  $L$  – кількість експериментів, коли порядок альтернатив було повністю відновлено.

Таблиця 4 – Порівняння моделей оцінки узагальненої корисності проектних рішень (за результатами 1000 експериментів)

Критерій	$K_{\max}$	$K_{\text{серед}}$	$\Delta K_{\max}$	$\Delta K_{\text{серед}}$	$t_{\text{серед}}, \text{с}$	$W$	$L$
Адитивний	0,2811	0,0542	0,2811	0,0603	0,0162	5	123
Мультиплікативний	0,3605	0,0761	0,3605	0,0822	0,0191	33	111
АМ	0,2651	0,0515	0,2651	0,0576	0,0240	14	125
На основі ПКГ	0,2431	0,0434	0,2338	0,0494	0,2243	71	176
Експонентний (8)	0,2460	0,0417	0,2460	0,0478	0,0120	3	119
Ентропійний (9)	0,1271	0,0270	0,1283	0,0331	0,0133	24	118
Модифікація АМ(10)	0,2554	-0,0001	0,1580	0,0059	0,3317	680	140
Модифікація ПКГ (11)	0,1906	0,0183	0,1906	0,0244	0,1562	179	261

Основні результати розділу опубліковані в [4, 5, 10, 11, 13 – 18].

У **шостому розділі** наведено опис розробленого програмного забезпечення та приклади розв’язання задач синтезу та аналізу територіально розподілених систем. Для розв’язання задач синтезу та аналізу ТРС розроблено інтерактивний програмний засіб *STO\_version\_0*.

Програмний засіб дозволяє після графічного введення координат розміщення елементів системи або після зчитування їх з файлу та введення інших даних: виконати структурно-топологічну оптимізацію системи (декількома методами за декількома критеріями); здійснити аналіз топології шляхом виконання структурно-топологічної оптимізації синхронно з інтерактивною зміною координат одного з елементів; провести ідентифікацію транспортних запізнь для фіксованої топологічної структури; провести моделювання системної динаміки об’єкта в цілому з урахуванням транспортних запізнь для фіксованої топологічної структури (на основі двох базових моделей функціонування сервісних систем); виконати аналіз проектних варіантів об’єкта шляхом моделювання системної динаміки зі зміненими значеннями параметрів моделі; у автоматичному режимі провести порівняльний аналіз методів структурно-топологічної оптимізації.

У програмному засобі реалізовано 15 методів структурно-топологічної оптимізації: повний направлений перебір варіантів (побудований послідовним



та рекурсивним алгоритмами); запропонована у роботі модифікація направленого перебору (за послідовним та рекурсивним алгоритмами); запропонована у роботі спрощена модифікація направленого перебору (за послідовним та рекурсивним алгоритмами); метод «найближчих сусідів» (Дисарта-Георганаса); модифікація направленого перебору варіантів, коли у якості потенціальних вузлів не розглядаються «висячі» вершини мінімального стягуючого дерева; модифікація направленого перебору варіантів, коли у якості потенціальних вузлів не розглядаються «висячі» вершини мінімального стягуючого до центру дерева; метод покоординатної оптимізації; модифікація методу покоординатної оптимізації, коли у якості потенційного вузла розглядаються елементи, що підключені до поточного вузла; модифікація методу покоординатної оптимізації, коли у якості потенційного вузла розглядаються елементи, що знаходяться на заданій відстані від поточного вузла; модифікація методу покоординатної оптимізації; метод покоординатної оптимізації, коли при збільшенні кількості вузлів спочатку генерується випадковий варіант рішення; метод однокрокової покоординатної оптимізації, коли у якості потенційного вузла розглядається найближчий до поточного вузла елемент; модифікація методу покоординатної оптимізації, з евристикою «найближчих сусідів»; модифікація методу покоординатної оптимізації, коли у якості потенційних вузлів не розглядаються «висячі» вершини мінімального стягуючого дерева; модифікація методу покоординатної оптимізації, коли у якості потенційних вузлів не розглядаються «висячі» вершини мінімального стягуючого до центру дерева.

Для аналізу динаміки територіально розподіленої системи або задля урахування показників динаміки під час структурно-топологічної оптимізації, у програмі пропонуються обирати одну з двох моделей системної динаміки: модель виробничо-збутового підприємства або модель сервісного підприємства. Параметри моделей та параметри моделювання задаються користувачем.

У якості критеріїв структурно-топологічної оптимізації в програмі пропонуються такі часткові критерії: мінімальна приведена вартість; ефективна системна динаміка – перехідний процес одного з обраних параметрів системи або суми декількох з них (потоки замовлень до центральної ланки, до ланки вузлів, до ланки елементів; темпи обслуговування замовлень у ЛЦ, у ЛВ, у ЛЕ; фактичні рівні резервів у ЛЦ, у ЛВ, у ЛЕ; рівні невиконаних замовлень у ЛЦ, у ЛВ, у ЛЕ; запізнення виконання замовлень у ЛЦ, у ЛВ, у ЛЕ); мінімізація відхилення від ідеальної динаміки обраного параметру чи комбінації параметрів системи.

У програмі реалізовано можливість багатокритеріального вибору та багатокритеріальної оптимізації на основі вказаних часткових критеріїв. Багатокритеріальний вибір здійснюється на множині оптимальних за обраними частковими критеріями варіантів рішень. Параметри запропонованих функцій корисності часткових критеріїв та вагові коефіцієнти часткових критеріїв задаються користувачем.

Наведені приклади розв'язання задач синтезу й аналізу ТРС підтвердили працездатність та ефективність розроблених в дисертаційній роботі математичних моделей, методів, алгоритмів та інструментального забезпечення для аналі-

зу й багатокритеріального синтезу централізованих територіально розподілених систем.

Основні результати розділу опубліковані в [1 – 3, 6, 7].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано розв'язання важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності систем автоматизації проектування територіально розподілених об'єктів шляхом розробки ефективних математичних моделей, методів, алгоритмів та програмного засобу для структурно-топологічної оптимізації централізованих територіально розподілених систем.

1. У роботі виконано системологічний аналіз сучасного стану проблеми структурно-топологічного синтезу територіально розподілених об'єктів, у результаті якого встановлено, що: незважаючи на численні публікації, присвячені проблемам їх структурного синтезу та оптимізації, більшість з них присвячено рішення окремих задач для конкретних видів об'єктів; практично відсутні роботи, в яких пропонуються ефективні моделі та методи розв'язання задач з урахуванням стійкості й динаміки функціонування об'єкта, оцінкою альтернативних варіантів одночасно за множиною функціонально-вартісних показників, а також оптимізації структур і топології об'єктів з великою кількістю елементів.

2. Через те, що топологія територіально розподілених об'єктів у багато чому визначає їх раціональні структурні, параметричні та технологічні характеристики, отримання ефективних проектних рішень можливо тільки шляхом сумісного визначення структури, параметрів елементів і зв'язків, їх топології та технології функціонування. Неможливість точного розв'язання усього комплексу задач для об'єктів з великою кількістю елементів призводить до необхідності використання технологій проектування на основі декомпозиційно-агрегативного підходу. У рамках обраного підходу доцільно використовувати інтерактивні ітераційні технології проектування з використання найбільш ефективних методів для кожної з задач проблеми, виходячи з її розмірності, вимог до точності її розв'язання та ресурсних обмежень. При цьому найбільш важливим у процесі проектування подібних об'єктів вважаються задачі структурно-топологічної оптимізації.

3. Отримала подальший розвиток системологічна модель загальної задачі структурного синтезу територіально розподілених об'єктів, що дозволяє отримувати рішення за множиною функціонально-вартісних критеріїв з урахуванням їх динамічних характеристик, на основі чого може бути підвищено ефективність процесів проектування.

4. У результаті дослідження вперше виявлено характерну особливість оптимальних структур ієрархічних територіально розподілених об'єктів, на основі якої запропоновано евристику, що дозволяє суттєво скоротити кількість варіантів, що аналізуються у процесі їх проектування (за результатами експериментів

у залежності від розмірності задачі у середньому на 38,12 – 52,70%). Удосконалено в частині зниження часової складності комбінаторний метод та метод по координатної структурно-топологічної оптимізації територіально розподілених об'єктів з нерегулярним та регулярним розміщеннями їх елементів, що дозволяє за прийнятний час розв'язувати практичні задачі більшої розмірності. За результатами експериментів скорочення часу розв'язання задач складає у залежності від їх розмірності 12,08 – 86,39%. Вперше на основі методології системної динаміки розроблено модель трирівневої територіально розподіленої сервісної системи, що дозволяє на етапі проектування аналізувати її стійкість до змін попиту на обслуговування.

5. Для системи підтримки прийняття багатокритеріальних проектних рішень запропоновано модифікації функцій корисності часткових критеріїв гіперболічного тангенсу та Гауса, які дозволяють розширити можливості формалізації переваг особи, що приймає рішення, та частіше за базові функції на 22 – 30% відновлюють її переваги. Запропоновано моделі оцінки узагальненої корисності проектних рішень на основі експоненційної функції, функції інформаційної ентропії, адитивно-мультиплікативної функції та функції на основі поліному Колмогорова-Габоора, що дозволяють відновлювати порядок переваг особи, що приймає рішення, частіше на 30 – 40%, ніж відомі моделі.

6. Розроблені математичні моделі та методи багатofакторного синтезу топологічних структур розвивають методологічну основу для створення ефективних інструментальних засобів систем підтримки прийняття рішень у сучасних технологіях автоматизованого проектування територіально розподілених об'єктів. Вони реалізовані програмно, апробовані, показали свою працездатність та ефективність на прикладах розв'язання задач синтезу топологічних структур та моделювання динаміки трирівневих централізованих сервісних систем, вибору багатofакторних проектних рішень. Практичне значення результатів підтверджується їх впровадженням. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес та використано при виконанні держбюджетних науково-дослідницьких робіт у Харківському національному університеті радіоелектроніки, в ТОВ «НПІ Політех», в ДПШ «Книжковий клуб "Клуб Сімейного Дозвілля"».

7. Розроблені моделі, методи та програмний засіб можуть бути використані при розв'язанні задач синтезу, планування розвитку та реінжинірингу структур корпоративних інформаційно-обчислювальних мереж, систем моніторингу, транспорту, зв'язку, виробництва та збуту продукції, керування, інших територіально розподілених об'єктів. Практичне використання результатів роботи дозволяє: підвищити ступень автоматизації процесів проектування, планування розвитку, реінжинірингу, управління; скоротити час проектування об'єктів; підвищити якість отриманих рішень, і на цій основі скоротити витрати на їх створення та експлуатацію.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Бескорвайный В.В. Модификация метода направленного перебора для оптимизации топологии систем с радиально-узловыми структурами / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Системи обробки інформації. – 2008. – №5(72). – С. 25 – 30.
2. Бескорвайный В.В. Эвристическая процедура для методов оптимизации топологии систем с радиально-узловыми структурами / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Системи обробки інформації. – 2008. – №7(74). – С. 22 – 27.
3. Бескорвайный В.В. Модификация метода направленного перебора для оптимизации топологии систем с регулярным распределением элементов / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Системи обробки інформації. – 2012. – №1 (108). – С. 12 – 16.
4. Бескорвайный В.В. Идентификация частной полезности многофакторных альтернатив с помощью S-образных функций / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Бионика интеллекта. – 2010. – №1(72). – С. 50 – 54.
5. Бескорвайный В.В. Исследование эффективности критериев обобщенной полезности для задач многокритериального оценивания / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2011. – №3(19). – С. 145 – 151.
6. Бескорвайный В.В. Модель динамики территориально распределенной сервисной системы / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2012. – №2 (27). – С. 74 – 81.
7. Бескорвайный В.В. Композиционная модель динамической распределенной задачи структурного синтеза территориально распределенных систем / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Системний аналіз, управління та інформаційні технології» – 2012. – №3(19). – С. 60 – 76.
8. Бескорвайный В.В. Моделирование динамики функционирования территориально распределенных систем оперативного обслуживания / В.В. Бескорвайный, Е.В. Назаренко // Международная научная конференция «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». Сборник тезисов докладов по материалам Международной научной конференции. – Харьков: ХНУРЭ, 2003. – С. 351 – 352.
9. Соболева Е.В. Эвристический метод оптимизации топологии территориально распределенных систем / Е.В. Соболева // 10-й юбилейный международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI в.»: Сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2006. – С. 403.
10. Соболева Е.В. S-образная функция полезности частных критериев для многофакторной оценки проектных решений / Е.В. Соболева // 13-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.»: Зб. Матеріалів форуму. Ч.2. – Харків: ХНУРЕ, 2009. – С. 247.

11. Соболева Е.В. Процедура поиска оптимальной топологии территориально распределенных систем, основанная на моделировании системной динамики / Е.В. Соболева // Микроэлектроника и информатика – 2007. 14-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2007. – С. 212.

12. Соболева Е.В. Повышение эффективности методов оптимизации топологии систем с радиально-узловыми структурами / Е.В. Соболева // 2-я международная конференция «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития»: Сб. материалов конференции. – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – С. 261 – 262.

13. Бескорвайный В.В. Функция для оценки полезности альтернатив в задачах структурной оптимизации территориально распределенных объектов / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Четверта наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 16-17 квітня 2008 року: Матеріали конференції. – Х.: ХУПС, 2008. – С. 121.

14. Соболева Е.В. Модификации критериев обобщенной полезности в задачах многокритериального анализа / Е.В. Соболева // Тези доповідей другої факультетської науково-практичної молодіжної школи-семінара студентів, аспірантів і молодих науковців «Інформаційні інтелектуальні системи – 2009». – Харків, 8-9 грудня: ХНУРЕ, 2009. – С. 58 – 62.

15. Бескорвайный В.В. Моделирование динамики при проектировании территориально распределенных сервисных систем / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій. Матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів та студентів, Одеса, 11-12 квітня 2012 року. – Одеса: Видавництво ОДАХ, 2012. – С. 88 – 90.

16. Бескорвайный В.В. Модель системной динамики муниципальной системы оперативного обслуживания / В.В. Бескорвайный, Е.В. Соболева // Математичне моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць одинадцятої всеукраїнської науково-технічної конференції, Одеса, 21-23 листопада 2012 року. – Одеса: Видавництво ННІХКтаЕ, 2012. – С. 56 – 57.

17. Соболева Е.В. Модификации критериев обобщенной полезности в задачах многокритериального анализа / Е.В. Соболева // Системный анализ и информационные технологии: материалы 12-й Международной научно-практической конференции SAIT 2010, Киев, 25-29 мая 2010 г. – К.: УНК «ИП-СА» НТУУ «КПИ», 2010. – С. 318.

18. Соболева Е.В. Исследование эффективности критериев обобщенной полезности для задач многокритериального оценивания / Е.В. Соболева // System analysis and information technologies: 14-th International conference SAIT 2012, Kyiv, Ukraine, April 24, 2012. Proceedings. – ESC “IASA” NTUU “KPI”, 2012 – С. 236 – 237 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://sait.kpi.ua/books/sait2012.ebook.pdf/view>.

## АНОТАЦІЯ

**Соболева О.В. Математичні моделі та методи структурно-топологічної оптимізації при проектуванні територіально розподілених об'єктів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2013.

У дисертаційній роботі отримано розв'язання важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності систем автоматизації проектування територіально розподілених об'єктів шляхом розробки ефективних математичних моделей, методів, алгоритмів та програмного засобу для структурно-топологічної оптимізації централізованих територіально розподілених систем. Переглянуто формалізацію поняття «система» та оновлено системологічну модель загальної задачі структурного синтезу територіально розподілених об'єктів.

Винайдено особливість оптимальних топологій ієрархічних структур, на основі якої запропоновано евристичну процедуру для спрощення методів структурно-топологічної оптимізації. Розроблені й досліджені методи оптимізації топологічних структур для систем з регулярним та нерегулярним розміщенням елементів. Розроблено модель системної динаміки територіально розподіленої сервісної системи. Визначено розмежування області використання відомих моделей оцінки узагальненої корисності для задач багатокритеріального вибору. Запропоновані нові моделі оцінки узагальненої корисності проектних рішень: експонентну, ентропійну, модифікації відомих адитивно-мультиплікативної та моделі у вигляді поліному Колмогорова-Габоора. Запропоновані модифікації функцій корисності часткових критеріїв гіперболічного тангенсу та Гауса. Наведено результати досліджень запропонованих математичних моделей та методів.

**Ключові слова:** територіально розподілений об'єкт, система, автоматизація проектування, метод структурно-топологічної оптимізації, модель системної динаміки, багатокритеріальний вибір, багатокритеріальна оптимізація, функція корисності часткового критерію, модель оцінки узагальненої корисності.

## АННОТАЦИЯ

**Соболева Е.В. Математические модели и методы структурно-топологической оптимизации при проектировании территориально распределенных объектов.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Харь-

ковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2013.

В диссертационной работе получено решение важной научно-практической задачи повышения эффективности систем автоматизации проектирования территориально распределенных объектов путем разработки эффективных математических моделей, методов, алгоритмов и программного средства для структурно-топологической оптимизации трехуровневых централизованных территориально распределенных систем.

В работе выполнен системологический анализ современного состояния проблемы структурно-топологического синтеза территориально распределенных объектов, в результате которого установлено, что: несмотря на многочисленные публикации, посвященные проблемам их структурного синтеза и оптимизации, большинство из них посвящено решению отдельных задач для конкретных видов объектов; практически отсутствуют работы, в которых предлагаются эффективные модели и методы решения задач с учетом устойчивости и динамики функционирования объекта, оценкой альтернативных вариантов одновременно по множеству функционально-стоимостных показателей, а также оптимизации структур и топологии объектов с большим количеством элементов.

В виду того, что топология территориально распределенных объектов во многом определяет их рациональные структурные, параметрические и технологические характеристики, получение эффективных проектных решений возможно только путем совместного определения структуры, параметров элементов и связей, их топологии и технологии функционирования. Невозможность точного решения всего комплекса задач для объектов с большим количеством элементов приводит к необходимости использования технологий проектирования на основе декомпозиционно-агрегативного подхода. В рамках выбранного подхода целесообразно использовать интерактивные итерационные технологии проектирования с использованием наиболее эффективных методов для каждой из задач проблемы, исходя из ее размерности, требований по точности ее решения и ресурсных ограничений. При этом наиболее важными в процессе проектирования подобных объектов считаются задачи структурно-топологической оптимизации.

Получила дальнейшее развитие системологическая модель общей задачи структурного синтеза территориально распределенных объектов, позволяющая получать решения по множеству функционально-стоимостных критериев с учетом их динамических характеристик и на этой основе которой может быть повышена эффективность процессов проектирования.

В результате исследования впервые выявлена характерная особенность оптимальных структур иерархических территориально распределенных объектов, на основе которой предложена эвристика, позволяющая существенно сократить количество анализируемых вариантов в процессе их проектирования (по результатам экспериментов в зависимости от размерности задачи в среднем на 38,12 – 52,70%). Усовершенствованы в части снижения временной сложности комбинаторный метод и метод покоординатной структурно-

топологической оптимизации трехуровневых территориально распределенных объектов с нерегулярным и регулярным размещением их элементов, что позволяет за приемлемое время решать практические задачи более высокой размерности. По результатам экспериментов сокращение времени решения задачи составляет в зависимости от ее размерности 12,08 – 86,39%. Впервые на основе методологии системной динамики разработана модель трехуровневой территориально распределенной сервисной системы, позволяющая на этапе проектирования анализировать ее устойчивость к изменению спроса на обслуживание.

Для системы поддержки принятия многокритериальных проектных решений предложены модификации функций полезности частных критериев гиперболического тангенса и Гаусса, которые позволяют расширить возможности формализации предпочтений лица, принимающего решения, и чаще базовых функций на 22 – 30% восстанавливают его предпочтения. Предложены модели оценки обобщенной полезности проектных решений на основе экспоненциальной функции, функции информационной энтропии, аддитивно-мультипликативной функции и функции на основе полинома Колмогорова-Габора, позволяющие восстанавливать порядок предпочтений лица, принимающего решения, чаще на 30 – 40%, чем известные модели.

Разработанные математические модели и методы многофакторного синтеза топологических структур развивают методологическую основу для создания эффективных инструментальных средств систем поддержки принятия решений в современных технологиях автоматизированного проектирования территориально распределенных объектов. Они реализованы программно, апробированы, показали свою работоспособность и эффективность на примерах решения задач синтеза топологических структур и моделирования динамики трехуровневых централизованных сервисных систем, выбора многофакторных проектных решений. Практическое значение результатов подтверждено их внедрением.

Разработанные модели, методы и программное средство могут быть использованы при решении задач синтеза, планирования развития и реинжиниринга структур корпоративных информационно-вычислительных сетей, систем мониторинга, транспорта, связи, производства и сбыта продукции, управления, других территориально распределенных объектов. Практическое использование результатов работы позволяет: повысить степень автоматизации процессов проектирования, планирования развития, реинжиниринга, управления; сократить время проектирования объектов; повысить качество получаемых решений и на этой основе сократить затраты на их создание и эксплуатацию.

**Ключевые слова:** территориально распределенный объект, система, автоматизация проектирования, метод структурно-топологической оптимизации, модель системной динамики, многокритериальный выбор, многокритериальная оптимизация, функция полезности частного критерия, модель оценки обобщенной полезности.



## SUMMARY

**O.V. Soboleva. Mathematical models and methods for structural-topological optimization for territorial distributed object's synthesis.** – Thesis.

The dissertation for degree of the Candidate of Technical Science by speciality 05.13.12 – Systems for Computer-Aided Design. – The Kharkiv National University for Radioelectronics. Kharkiv, 2013.

The dissertation work gives the decision of important scientific and practical problem of efficiency raise of CAD-systems for territorial distributed objects. It did through development of efficient mathematical models, methods, algorithms and software tools for structural topological optimization of centralized territorial distributed systems. A formalization of concept “system” is reviewed and the systemology model of general problem of territorial distributed system's structural synthesis is updated.

The character of optimal hierarchical structure topologies was invented and it's proposed the heuristic procedure to simplify methods for topology optimization. Methods for topology optimization of systems with regular and irregular element's placement are developed and researched. A system dynamic model of territorial distributed service system is developed. It defined limits of using of known general utility estimation models for multi-objective optimisation and choosing. There are proposed new general utility estimation models: the exponential one, the entropy one, the modification of known additive-multiplicative model and the model in the Kolmogorov-Gabor's polynomial form. Also there're proposed new local criteria's utility functions: the modified Gaussian function and the modified hyperbolic tangent. Research results of proposed mathematical models and methods are presented.

**Keywords:** territorial distributed object, system, computer aided design, method of structural topology optimization, system dynamic model, multi-objective optimisation, multi-objective choosing, local criteria's utility function, general utility estimation model.

Підп. до друку 04.01.11. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ . Спосіб друку – ризографія.

Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим.

Зам. № 2-461. Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, пр. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ

Харків, просп. Леніна, 14