

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

СТЕРІН Вячеслав Леонідович

УДК 621.391

**ДИНАМІЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОД СТРУКТУРНОГО І
ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СИНТЕЗУ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри телекомунікаційних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
КУЧУК Георгій Анатолійович,
Науковий Центр Повітряних Сил Харківського
університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
МО України,
провідний науковий співробітник;

кандидат технічних наук
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут» МОН України,
доцент кафедри обчислювальної техніки і програмування.

Захист відбудеться «19» лютого 2014 року о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

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

Автореферат розісланий « 18 » січня 2014 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є.В. Дуравкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Постійне зростання вимог до ефективності телекомунікаційних систем (ТКС), що супроводжується розширенням можливостей з підтримки якості обслуговування (Quality of Service, QoS), накладає відбиток на процеси їх проектування. Саме на етапі проектування закладається необхідний резерв мережного ресурсу, який повинен оптимально розподілятися, а при необхідності і нарощуватися в процесі функціонування ТКС.

Важливо відзначити, що процес проектування ТКС не повинен розглядатися як подія, пов'язана з синтезом мережі виключно «з нуля». Як правило, трактування даного терміну значно ширше і охоплює завдання перепланування, реструктуризації існуючих ТКС або створення так званих віртуальних приватних мереж в інтересах окремих фірм і компаній на базі існуючої телекомунікаційної інфраструктури того чи іншого оператора зв'язку (провайдера).

У загальному випадку при вирішенні завдань проектування ТКС необхідно враховувати множину суперечливих за своїм змістом вимог, починаючи від максимізації числа користувачів, охоплених послугами зв'язку; підтримки заданого рівня якості обслуговування і закінчуючи мінімізацією сумарної вартості створюваної мережі. У зв'язку з цим важливо задіяти можливості системного підходу як на етапі формалізації задач проектування, так і при забезпеченні їх ефективного розв'язання. Нерідко при вирішенні завдань проектування ТКС на рівнях її структурного і функціонального синтезу нерідко знаходили і знаходять своє застосування евристичні підходи, засновані більше на інженерній інтуїції, ніж на теоретично обґрунтованих рішеннях, що хоч і призводило до доступності в застосуванні одержуваних інженерних методик, але в цілому негативно позначалося на ефективності кінцевих проектних рішень. Тому тема дисертаційної роботи, що пов'язана з розв'язанням науково-прикладної задачі щодо розробки динамічних математичних моделей та методу структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання науково-дослідної роботи: № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами», в якій автор виступав співвиконавцем. Отримано патент на корисну модель «Спосіб маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах».

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу структурно-функціонального синтезу ТКС. У ході розв'язання поставленої наукової задачі сформульовано та вирішено наступні завдання дослідження:

- аналіз відомих математичних моделей і методів структурного та функціонального синтезу телекомунікаційних систем, порівняння їх переваг та недоліків;
- розробка системи динамічних техніко-економічних моделей структурного та функціонального синтезу телекомунікаційних систем;
- розробка динамічної математичної моделі структурного та функціонального синтезу віртуальних приватних мереж;
- вдосконалення методу структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем,
- оцінка ефективності процесу структурного та функціонального синтезу ТКС, що організовано в рамках запропонованих моделей і методу;
- розробка рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації рішень.

Об'єкт дослідження: процес структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем.

Предмет дослідження: динамічні моделі та метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем.

Методи дослідження. У роботі знайшов своє застосування цілий ряд сучасних методів дослідження. При розробці динамічних моделей структурного та функціонального синтезу ТКС було використано апарат теорії множин, теорії диференційно-різницевого рівнянь. При вдосконаленні методу структурно-функціонального синтезу використано можливості теорії оптимального управління та методів математичного (лінійного, нелінійного, змішаного) програмування. Для оцінки ефективності отриманих рішень використовувалися методи теорії телетрафіка, моделі систем масового обслуговування.

Наукова новизна отриманих результатів. Під час розв'язання поставлених задач були отримані наступні нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано систему динамічних техніко-економічних моделей структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем, новизна яких полягає в тому, що для опису процесів перерозподілу капіталовкладень на різних етапах проектування ТКС та нарощування пропускних здатностей трактів передачі (ТП) використано систему лінійних різницевого рівнянь, а для опису процесів маршрутизації та обмеження трафіка на границі транспортної мережі застосовано систему лінійних алгебраїчних рівнянь стану. Використання моделі дозволило забезпечити більш повне врахування техніко-економічних особливостей процесів структурно-функціонального синтезу ТКС.

2. Вперше запропоновано динамічну математичну модель структурно-функціонального синтезу віртуальних приватних мереж, новизна якої полягає в тому, що вона представлена як системою лінійних різницевих рівнянь для опису процесу перерозподілу пропускних здібностей трактів передачі між різними віртуальними приватними мережами, так і нелінійними алгебраїчними рівняннями для опису процесів маршрутизації і управління перевантаженням. Використання моделі дозволяє забезпечити більш ефективне управління ресурсами мережі провайдера при створенні віртуальних приватних мереж за рахунок більш повного врахування динаміки процесів інформаційного обміну, що протікають в ній.

3. Вдосконалено метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем, новизна якого полягає в тім, що він враховує багатоетапність процесу структурного та функціонального синтезу ТКС, забезпечуючи узгоджене розв'язання таких важливих задач, як розподіл капіталовкладень між етапами проектування, вибір топології транспортної мережі та пропускної здатності її трактів передачі, розподіл потоків на рівні транспортної мережі (маршрутизація) та доступу, визначення порядку підключення окремих абонентів і мереж доступу до вузлів транспортної мережі. Використання запропонованого методу дозволяє забезпечити більш ефективне використання наявного техніко-економічного ресурсу при проектуванні ТКС.

Обґрунтованість та достовірність нових наукових і практичних результатів, отриманих в даній дисертаційній роботі, підтверджувалася коректним прийняттям гіпотез, необхідних припущень і наближень; збігом в окремих випадках з відомими раніше результатами; використанням положень добре апробованого математичного апарату – теорій телетрафіка, диференційно-різницевих рівнянь, оптимального управління і методів математичного програмування, а також чіткою фізичною інтерпретацією результатів дослідження.

Наукове значення результатів роботи полягає в подальшому розвитку елементів теорії, моделей та методу структурного та функціонального синтезу ТКС. Використання розроблених моделей і методу дозволило надати динамічний характер і забезпечити більшу узгодженість у вирішенні окремих завдань структурного та функціонального синтезу ТКС.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що запропоновані моделі та метод можуть і мають бути покладені в основу відповідних систем автоматизованого проектування телекомунікаційних систем та мереж. Реалізація на практиці отриманих рішень дозволяє, як показали результати проведених досліджень, більш ефективно використати наявний фінансовий та технологічний ресурс при проектуванні ТКС. За результатами дисертації отримано патент на корисну модель.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані в ході виконання науково-дослідної роботи № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами» (№ ДР 0109U000662); в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ у лекційному курсі дисципліни «Методи проектування телекомунікаційних систем та мереж»; при обґрунтуванні проектних рішень в ході розвитку телекомунікаційної інфраструктури АТ «Київстар». Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

Особистий вклад здобувача. Всі наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно [1-7]. Крім того, в роботі [1] автором проведено огляд методів забезпечення якості обслуговування при проектуванні та розгортанні мереж мобільного зв'язку четвертого покоління; в статті [2] здобувачем вперше запропоновано динамічну математичну модель структурного і функціонального синтезу ТКС; в статті [3] здобувачем запропоновано динамічну модель структурно-функціонального синтезу та оптимізації ТКС, в рамках якої вже не потрібне попереднє розв'язання задачі розподілу капіталовкладень між етапами проектування, крім того, модифікація також торкнулася перегляду критерію оптимальності проектних рішень; в роботі [4] автором проаналізовано можливість і оцінено ефективність використання моделі балансування навантаження за критерієм мінімальності довжин черг на маршрутизаторах в ході розв'язання задачі розподілу потоків при проектуванні ТКС; в публікації [5] автором здійснено порівняння ефективності рішень задач розподілу потоків при їх багатошляховій маршрутизації за різними критеріями, пов'язаними з довжинами черг на маршрутизаторах ТКС; в публікації [6] автором проведено аналіз динамічної моделі узгодженого розв'язання задач структурного та функціонального синтезу транспортної телекомунікаційної мережі.

Апробація. Апробація основних положень дисертаційної роботи проводилася в ході семи наукових конференцій [8-14], а саме на VIII Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні інформаційно-комунікаційні технології" – COMINFO'2012 (2012 р., Крим-Ялта-Лівадія, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій); IX науковій конференції "Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті" (2012 р., Київ, ДУІКТ); 67-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (2012 р., Одеса, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова); XIIth International Conference THE EXPERIENCE OF DESIGNING AND APPLICATION OF CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONICS (2013 р., Поляна-Свалява-Львів, Національний університет «Львівська політехніка»); II Міжнародній науково-технічній та науково-методичній конференції "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и

образовани" (2013 р., Санкт-Петербург, Санкт-Петербурзький державний університет телекомунікацій ім. проф. М. О. Бонч-Бруєвича); 23-й Міжнародній конференції "НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології" (КриМіКо'2013, Севастополь, Севастопольський національний технічний університет); X Міжнародній науково-технічній конференції "Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2013" (2013 р., Володимир, Володимирський державний університет імені О.Г. і Н.Г. Столетових).

Публікації. Здобувачем опубліковано 15 наукових праць, з яких 7 статей у фахових виданнях України (5 статей) [1-4, 7] та Російської Федерації (2 статті) [5, 6]; 7 матеріалів конференцій, з яких п'ять проходило в Україні [8-11, 13], а дві [12, 14] в Російській Федерації. Дві доповіді представлено на конференціях, які проходили під егідою IEEE [11, 13], вони викладені в базах IEEEExplore та Scopus. Отримано патент на корисну модель [15]. Зазначені публікації повністю відображають наукові результати та висновки дисертаційної роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу та чотирьох розділів. Загальний обсяг роботи становить 145 сторінок, у тому числі 136 сторінок основного тексту, 27 рисунків та 2 таблиці усього на 9 сторінках. Список використаних джерел містить 102 найменування, викладених на 10 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито основний зміст і загальний стан проблеми та окремих задач щодо структурного та функціонального синтезу телекомунікаційних систем, обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

У **першому розділі** показано, що традиційно в телекомунікаціях ефективність вирішення завдань щодо забезпечення якості обслуговування багато в чому визначається обсягом і, що важливо, доступністю мережних ресурсів, в якості яких, як правило, виступають розгалужена інфраструктура, пропускна здатність (ПЗ) трактів передачі, буферна ємність маршрутизаторів та ін. При цьому необхідний запас мережного ресурсу закладається саме на етапі проектування ТКС, який має ґрунтуватися на узгодженому вирішенні таких основних взаємодоповнюючих один одного завдань: визначення місця розташування і характеристик вузлів транспортної ТКС; встановлення порядку підключення мереж доступу і (або) окремих абонентів до приграничних вузлів транспортної мережі; вибір топології (ВТ) транспортної мережі та пропускних здібностей (ВПЗ) її трактів передачі; розподіл потоків (РП) у транспортній мережі; перерозподіл трафіка, що надходить від мереж доступу, між декількома приграничними вуз-

лами транспортної мережі та обмеження його інтенсивності через неможливість обслуговування з заданим рівнем QoS.

За результатами проведеного аналізу переваг і недоліків відомих загально-теоретичних підходів і основних прикладних технологій до розв'язання задач структурного та функціонального синтезу ТКС визначено, що основними вимогами, які пред'являються до перспективних рішень, є як забезпечення максимально узгодженого розв'язання окремих техніко-економічних задач структурного та функціонального синтезу ТКС, так і врахування багатоетапності (динамічного характеру) процесу проектування в цілому.

Показано, що виконати на практиці сформульовані вимоги можливо лише ґрунтуючись на відповідному математичному описі, що формалізує аналізовані задачі з точки зору їх постановки і, що важливо, варіантів передбачуваного розв'язання. У цьому зв'язку сформульована до вирішення актуальна науково-прикладна задача, яка полягає в розробці динамічних математичних моделей і методу структурного та функціонального синтезу телекомунікаційних систем.

У **другому розділі** вперше запропоновано систему динамічних техніко-економічних моделей структурного та функціонального синтезу телекомунікаційних систем. Залежно від особливостей постановки і варіантів розв'язання задач структурно-функціонального синтезу ТКС знайшли своє застосування різні підходи до їх математичного опису.

При розробці даної математичної моделі прийнято припущення, що місце розташування вузлів (маршрутизаторів) транспортної мережі фіксоване, а також відомий порядок ймовірного підключення абонентів (мереж доступу) до цих вузлів. Тоді передбачувана структура телекомунікаційної системи описується графом $G(R, L)$, множина вершин якого $R = R^* \cup R^{**}$ моделює множину вузлів проектованої мережі $R^* = \{R_i^*, i = \overline{1, N}\}$, де R_i^* – i -й вузол проектованої транспортної телекомунікаційної мережі (ТТКМ), N – їх загальна кількість (потужність множини R^*); а також множину абонентів (мереж доступу) $R^{**} = \{R_j^{**}, j = \overline{1, M}\}$, де R_j^{**} – j -й абонент (мережа доступу) проектованої ТКС, M – їх загальне число (потужність множини R^{**}). Множина дуг $L = L^* \cup L^{**}$ описує множину ймовірних трактів передачі між вузлами ТТКМ $L^* = \{L_{i,j}^*, i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ і ліній доступу $L^{**} = \{L_{m,s}^*, m = \overline{1, M}; s = \overline{1, N}\}$ між окремими абонентами (мережами доступу) і приграничними вузлами ТТКМ, можливість створення яких закладена в ході проектування, тобто $L_{i,j}^*$ – створюва-

ний тракт передачі (ТП) між i -м та j -м вузлами ТТКМ, а $L_{m,s}^{**}$ – можлива лінія доступу (ЛД) від m -го абонента (мережі доступу) до s -го вузла ТТКМ.

З точки зору техніко-економічного трактування задачі структурно-функціонального синтезу ТКС передбачається також, що відомі наступні вихідні дані: Q – загальний обсяг капіталовкладень в створювану ТКС, вимірюваний, наприклад, в гривнях (грн); K – число часових інтервалів (етапів, стадій) у загальному процесі структурно-функціонального синтезу ТКС; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – середня тривалість одного етапу структурно-функціонального синтезу ТКС; t_k и t_{k+1} – час початку та закінчення k -го часового інтервалу;

$b_{i,j}(k)$ – питома вартість нарощування одиниці пропускної здатності ТП $L_{i,j}^*$ на k -му часовому інтервалі, вимірювана в $грн/(бім/с)$; $a_{i,j}(k)$ – коефіцієнт втрат (зниження) пропускної здатності ТП $L_{i,j}^*$ за k -му часовому інтервалі.

Крім того, введені такі позначення: $q(k)$ – обсяг капіталовкладень в створювану ТКС на k -му часовому інтервалі (грн); $c_{i,j}(k)$ – пропускна здатність створюваного ТП $L_{i,j}^*$ на k -му часовому інтервалі ($бім/с$); $q_{i,j}(k)$ – обсяг капіталовкладень, спрямований на нарощування ПЗ тракту передачі $L_{i,j}^*$ на k -му часовому інтервалі ($грн$); $u_{i,j}(k)$ – частка капіталовкладень, доступних на k -му часовому інтервалі, яка виділена на нарощування ПЗ ТП $L_{i,j}^*$;

Тоді динаміку зміни ПЗ трактів передачі ТТКМ в ході її структурно-функціонального синтезу можна описати системою різницевих рівнянь стану:

$$c_{i,j}(k+1) = a_{i,j}(k)c_{i,j}(k) + Qu_{i,j}(k)g_{i,j}(k), \quad (1)$$

число яких відповідає потужності множини L^* , $g_{i,j}(k) = 1/b_{i,j}(k)$, а приріст ПЗ ТП $L_{i,j}^*$ за k -й часовий інтервал розраховується як

$$\Delta c_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k)g_{i,j}(k), \quad (2)$$

який підкорюється такій умові:

$$0 \leq \Delta c_{i,j}(k) \leq \Delta c_{i,j}^{\max}(k), \quad (3)$$

де параметр $\Delta c_{i,j}^{\max}(k)$ характеризує максимально можливу величину збільшення ПЗ тракту передачі $L_{i,j}^*$ за k -й часовий інтервал.

У ряді випадків може виникнути необхідність у введенні обмеження

$$0 \leq q(k) \leq q^{\max}(k), \quad (4)$$

коли максимальний обсяг фінансування k -го етапу ($q^{\max}(k)$) лімітований.

З точки зору вирішення завдань ВТ і ВПЗ трактів передачі в системі рівнянь (1) пропускні здатності $c_{i,j}(k)$ ТП трактуються як змінні стану процесу структурно-функціонального синтезу ТКС, а змінні $u_{i,j}(k)$ виступають як керуючі, що регламентують процес перерозподілу капіталовкладень на створення окремих ТП і нарощування їх пропускної здатності.

Наявність в рамках довільного етапу в структурі проектованої ТТКМ того чи іншого ТП ґрунтується на тому, що його ПЗ $c_{i,j}(k)$ стає більшою за нуль. Мають місце умови

$$0 \leq u_{i,j}(k), \quad \sum_{k=1}^K \sum_{L_{i,j}^*} u_{i,j}(k) \leq 1, \quad (5)$$

виконання яких, поряд з умовою (1), гарантує відсутність перевитрат грошових коштів у ході структурно-функціонального синтезу ТКС.

Тоді обсяг капіталовкладень на кожний етап проектування і на створення окремих трактів передачі можна розрахувати відповідно як

$$q(k) = Q \sum_{L_{i,j}^*} u_{i,j}(k) \quad \text{або} \quad q(k) = \sum_{L_{i,j}^*} q_{i,j}(k) \quad \text{при} \quad \sum_{k=1}^K q(k) = Q, \quad (6)$$

де $q_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k)$.

Вирази (1)-(6) в динаміці описують узгоджене розв'язання задач вибору топології і пропускних здібностей трактів передачі проектованої ТКС з урахуванням багатоетапності процесу структурно-функціонального синтезу. При цьому закладається фундамент для вирішення інших завдань з проектування ТКС – завдань управління трафіком (маршрутизації, обмеження трафіка).

Для математичної формалізації задач управління трафіком (маршрутизації, обмеження трафіка і т.і.), які розв'язуються в ході функціональної оптимізації ТКС, введені додаткові позначення: $Z = \{Z_{h,m}; h = \overline{1, H}; m = \overline{1, M}\}$ – множина потоків, що надходять в ТТКМ від абонентів та мереж доступу, а $Z_{h,m}$ – h -й потік пакетів, що надходять від m -го абонента (мережі доступу) на вузол транспортної мережі; $r_{h,m}(k)$ – середня інтенсивність потоку $Z_{h,m}$ на k -му часовому інтервалі ($\text{bit}/\text{с}$); $s_{h,m}$ та $d_{h,m}$ – вузол-джерело та вузол-отримувач потоку пакетів $Z_{h,m} \in Z$ відповідно. Для опису процесу маршрутизації в рамках запропонованої моделі як маршрутні змінні виступають $x_{i,j}^{h,m}(k)$, які характеризують частку інтенсивності потоку $Z_{h,m} \in Z$, що протікає в тракті $L_{i,j}^*$ ТТКМ на k -

му інтервалі; $\alpha_{h,m}$ – доля інтенсивності потоку $Z_{h,m} \in Z$, що отримала відмову в обслуговуванні ТТКМ на k -му часовому інтервалі.

З метою недопущення втрат пакетів на вузлах ТТКМ в ході розрахунку змінних $x_{i,j}^{h,m}(k)$ та $\alpha_{h,m}$ необхідно виконати умови збереження потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = 0 \quad \text{при } Z_{h,m} \in Z, \quad i \neq s_{h,m}, d_{h,m}; \\ \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = 1 - \alpha_{h,m}(k) \quad \text{при } Z_{h,m} \in Z, \quad i = s_{h,m}; \\ \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = \alpha_{h,m}(k) - 1 \quad \text{при } Z_{h,m} \in Z, \quad i = d_{h,m}, \end{array} \right. \quad (7)$$

а також умови запобігання перевантаженню трактів передачі ТТКМ:

$$\sum_{Z_{h,m} \in Z} r_{h,m}(k) x_{i,j}^{h,m}(k) \leq c_{i,j}(k); \quad L_{i,j}^* \in L. \quad (8)$$

Відповідно з фізикою розв'язуваної задачі (7) на маршрутні змінні також можуть накладатися обмеження:

$$x_{i,j}^{h,m}(k) \in \{0,1\} \quad (9) \quad \text{або} \quad 0 \leq x_{i,j}^{h,m}(k) \leq 1, \quad (10)$$

які вводяться при моделюванні процесів одно- (9) або багатошляхої (10) маршрутизації в ході розв'язання задачі розподілу потоків.

На змінні відмов накладаються такі обмеження:

$$0 \leq \alpha_{h,m}(k) \leq 1 \quad (11) \quad \text{або} \quad \alpha_{h,m}(k) \in \{0,1\}, \quad (12)$$

якщо на основі договору про рівень сервісу (SLA) допускається (11) або не допускається (12) часткове обмеження швидкості доступу в транспортну мережу.

Окрім опису одноадресної маршрутизації (7) у розділі розглянуті також моделі процесів маршрутизації з передобчисленням шляхів, маршрутизації багатоадресних та широковісальних потоків.

У роботі пропонується перелік критеріїв оптимальності пропонованих рішень, які можуть використовуватися в залежності від цілей і особливостей процесу проектування. Найбільш комплексний характер рішень забезпечується при виборі критерію, пов'язаного з мінімізацією функціоналу:

$$\begin{aligned} J = & \sum_{k=1}^K \sum_{Z_{h,m} \in Z} \sum_{L_{i,j}^* \in L^*} f_{i,j}^{h,m}(k) x_{i,j}^{h,m}(k) + \sum_{k=1}^K \sum_{L_{i,j}^* \in L^*} v_{i,j}(k) c_{i,j}(k) + \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{L_{i,j}^*} \gamma_{i,j}(k) u_{i,j}(k) + \sum_{k=1}^K \sum_{Z_{h,m} \in Z} w_{h,m}(k) r_{h,m}(k) \alpha_{h,m}(k), \end{aligned} \quad (13)$$

в якому $f_{i,j}^{h,m}(k)$ – маршрутна метрика ТП $L_{i,j}^*$ при передачі пакетів потоку $Z_{h,m}$; $v_{i,j}(k)$ – відносна вартість використання одиниці пропускної здатності тракту передачі $L_{i,j}^*$; $\gamma_{i,j}(k)$ – відносний штраф за надмірне використання доступних засобів для підвищення пропускної здатності тракту передачі $L_{i,j}^*$; $w_{h,m}(k)$ – питомий прибуток від обслуговування потоку $Z_{h,m}$ на k -му часовому інтервалі, що вимірюється в $грн/(біт/с)$.

Форма критерію (13) і вид динамічних обмежень (1) дозволяють класифікувати сформульовану оптимізаційну задачу як задачу оптимального управління, для розв'язання якої можуть використовуватися метод динамічного програмування Беллмана, принцип максимуму Понтрягіна, числові методи розрахунку.

У рамках запропонованої моделі забезпечується більш повний порівняно з відомими рішеннями облік техніко-економічних особливостей процесу структурного та функціонального синтезу телекомунікаційного систем. Модель в цілому описує в динаміці процес структурно-функціонального синтезу ТКС та орієнтує на багатоетапну оптимізацію цього процесу на рівні погодженого розв'язання задач ВТ та ВПЗ ТП, маршрутизації і обмеження інтенсивності трафіка, що надходить у транспортну мережу від мереж доступу. Високий рівень узгодженості забезпечувався, насамперед, за рахунок вибору комплексного виду критерію оптимальності (13) і умов, що зв'язують між собою різні за своїм фізичним змістом керуючі змінні $u_{i,j}(k)$, $c_{i,j}(k)$, $x_{i,j}^{h,m}(k)$, $\alpha_{h,m}(k)$.

На підставі моделі (1)-(13) у розділі також запропоновано модель, що описує процес погодженого розв'язання додатково ще й задач щодо встановлення порядку підключення мереж доступу і (або) окремих абонентів до приграничних вузлів транспортної мережі та перерозподілу трафіка, що надходить від мереж доступу, між кількома приграничними вузлами ТТКМ.

Можливість забезпечити оптимальність рішень задач структурно-функціонального синтезу ТКС на всьому протязі процесу проектування, завдяки вибору динамічної моделі (1)-(12) і критерію (13), є важливою перевагою по відношенню до однокрокових стратегій проектування з точки зору більш високої гнучкості при введенні (нарощуванні) нових мережних ресурсів – трактів передачі (доступних маршрутів) та їх пропускної здатності.

У третьому розділі проведено аналіз принципів побудови віртуальних приватних мереж, наведено класифікацію VPN і сформульовано основні вимоги, які пред'являються до подібного роду рішень з точки зору їх синтезу (проектування) та забезпечення QoS. Встановлено, що стримуючим фактором у підвищенні продуктивності VPN-мереж і забезпечення в них якості обслуговування є неефекти-

вність розподілу між ними ресурсів мережі сервіс-провайдера. Показано, що вихід із ситуації бачиться в переході до більш ефективних моделей структурного та функціонального синтезу VPN. Враховуючи високу динаміку стану IP/MPLS-мереж, на базі яких, як правило, і створюються VPN, математичні моделі, що описують процеси створення і управління ресурсами віртуальних приватних мереж, мають відноситися до класу динамічних, представлених у просторі станів.

При розробці динамічної моделі структурно-функціонального синтезу віртуальних приватних мереж структура мережі провайдера описувалась за допомогою графа $G = (R, L)$, в якому $R = \{R_i, i = \overline{1, m}\}$ – множина маршрутизаторів мережі провайдера (Р-мережі), $L = \{L_{i,j}, i, j = \overline{1, m}, i \neq j\}$ – множина ТП між маршрутизаторами тієї ж Р-мережі. Тоді потужність множини $|R| = m$ визначає загальне число маршрутизаторів в Р-мережі, а $|L| = n$ – число ТП в ній. Вся множина маршрутизаторів розбивалась на дві підмножини: $R^{pe} = \{R_i^{pe}, i = \overline{1, m_{pe}}\}$ – підмножина приграничних маршрутизаторів (Provider Edge, PE); $R^p = \{R_j^p, j = \overline{1, m_p}\}$ – підмножина транзитних маршрутизаторів.

Кожній дугі $L_{i,j} \in L$ графа, що моделює відповідний тракт передачі в Р-мережі, ставиться у відповідність її пропускна здатність $c_{i,j}^P$. Також було прийнято, що загальне число створюваних VPN-мереж дорівнює m_c .

Кожному потоку відповідав ряд параметрів: R_s^{pe} – s-й PE-маршрутизатор, на який надходить потік пакетів в Р-мережу (вузол-джерело); R_d^{pe} – d-й PE-маршрутизатор, через який потік пакетів убуває з Р-мережі (вузол-одержувач); $r^{(l,g)}$ – інтенсивність l-го потоку, що циркулює в g-й VPN.

Тоді довільну g-ту VPN-мережу, яка поряд з іншими створюється на основі мережі сервіс-провайдера, можна представити у вигляді графа $G^{VPN_g} = (R^{VPN_g}, L^{VPN_g})$, де $R^{VPN_g} \in R$ – підмножина маршрутизаторів Р-мережі, які використовуються в інтересах g-ї VPN-мережі; $L^{VPN_g} \in L$ – множина трактів передачі Р-мережі, частина пропускної здатності яких може використовуватися для обслуговування потоків g-ї VPN-мережі.

При розробці математичної моделі структурно-функціонального синтезу віртуальних приватних мереж приймемо такі позначення: $\Delta t = t_{k+1}^{VPN} - t_k^{VPN}$ – період перерахунку керуючих змінних, пов'язаних зі створенням та функціону-

ванням VPN-мереж, t_k^{VPN} і t_{k+1}^{VPN} – час початку та закінчення k -го часового інтервалу; K^{VPN} – число часових інтервалів, протягом яких оптимізується (моделюється) робота VPN-мереж; $c_{i,j}^g(k)$ – пропускна здатність тракту передачі, який представлений дугою $L_{i,j} \in L$, виділена для каналу $L_{i,j}^{VPN_g}$ g -ї VPN (bit/c); $u_{i,j}^g(k)$ – доля пропускної здатності $c_{i,j}^P$ тракту передачі, представленою дугою $L_{i,j} \in L$, яка береться зі знаком «плюс», якщо виділяється для нарощування ПЗ $c_{i,j}^g(k)$ g -ї VPN, або зі знаком «мінус» при її перерозподілі в інтересах інших віртуальних приватних мереж.

Тоді динаміку стану (топології та зміни пропускних здібностей трактів передачі) створюваних однорангових VPN-мереж при розподілі ресурсів мережі сервіс-провайдера можна описати системою лінійних різницевих рівнянь:

$$c_{i,j}^g(k+1) = c_{i,j}^g(k) + u_{i,j}^g(k)c_{i,j}^P. \quad (14)$$

В рівняннях (14) величини $c_{i,j}^g(k)$ трактуються як змінні стану процесу структурно-функціонального синтезу VPN-мереж, а змінні $u_{i,j}^g(k)$ виступають як керуючі, що описують процес перерозподілу пропускної здатності ТП мережі сервіс-провайдера між каналами створюваних віртуальних приватних мереж. На ці змінні накладаються наступні умови-обмеження:

$$0 \leq c_{i,j}^g(k), \quad (g = \overline{1, m_c}), \quad (15) \quad \sum_{g=1}^{m_c} c_{i,j}^g(k) \leq c_{i,j}^P, \quad (16) \quad -1 \leq u_{i,j}^g(k) \leq 1. \quad (17)$$

Виконання умов (16), (17) гарантує те, що в процесі розподілу ресурсів мережі сервіс-провайдера пропускні здатності трактів передачі цієї мережі не будуть перевантажені. Додатковою керуючою (маршрутною) змінною, є величина $x_{i,j}^{(l,g)}$, яка характеризує долю l -го потоку, що протікає в каналі $L_{i,j}^{VPN_g}$ g -ї VPN. На ці змінні накладаються обмеження:

$$0 \leq x_{i,j}^{(l,g)} \leq 1, \quad (18)$$

дотримання яких орієнтує на маршрутизацію з балансуванням навантаження. В MPLS-мережі подібні рішення узгоджуються з концепцією Traffic Engineering.

Для запобігання перевантаження каналів створюваних віртуальних мереж клієнтськими потоками необхідно забезпечити виконання умов:

$$\sum_l r^{(l,g)} x_{i,j}^{(l,g)} \leq c_{i,j}^g(k), \quad (g = \overline{1, m_c}). \quad (19)$$

Для контролю за рівнем втрат пакетів на РЕ та Р-маршрутизаторах, викликаних переповненням черг на їх інтерфейсах, прийнято до розгляду наступні умови збереження потоку:

$$\sum_{j:(i,j)} x_{i,j}^{(l,g)} = 1; \quad (20) \quad \sum_{j:(i,j)} x_{i,j}^{(l,g)} - \sum_{j:(j,i)} x_{j,i}^{(l,g)} (1 - p_{j,i}^{(l,g)}) = 0; \quad (21)$$

$$\sum_{j:(i,j)} x_{j,i}^{(l,g)} (1 - p_{j,i}^{(l,g)}) = \varepsilon^{(l,g)}, \quad (22)$$

де $p_{i,j}^{(l,g)}$ – ймовірність втрат пакетів l -го потоку на j -му інтерфейсі i -го Р-маршрутизатора g -й VPN з причини перевантаження черги; $\varepsilon^{(l,g)}$ – доля інтенсивності l -го потоку, що циркулює в g -й VPN та обслугований мережею. Ймовірність $p_{i,j}^{(l,g)}$ розраховувалась відповідно до обраної моделі потоку та обслуговування пакетів. У ході розрахунку маршрутних змінних $x_{i,j}^{(l,g)}$ необхідно, щоб для l -го потоку ймовірність втрат пакетів g -й VPN була не більша допустимої:

$$1 - \varepsilon^{(l,g)} \leq p_{\text{доп}}^{(l,g)}. \quad (23)$$

Критерієм оптимальності рішень щодо структурно-функціонального синтезу VPN-мереж пропонується використовувати мінімум функціоналу

$$J = \sum_{k=1}^{K^{VPN}} \left[\sum_{g=1}^{m_c} \sum_l \sum_{L_{i,j} \in L} f_{i,j}^{(l,g)}(k) x_{i,j}^{(l,g)}(k) + \sum_{g=1}^{m_c} \sum_{L_{i,j} \in L} v_{i,j}^g(k) c_{i,j}^g(k) + \sum_{g=1}^{m_c} \sum_{L_{i,j} \in L} \gamma_{i,j}^g(k) u_{i,j}^g(k) \right], \quad (24)$$

в якому $f_{i,j}^{(l,g)}(k)$ – маршрутна метрика каналу, представленого дугою $L_{i,j}^{VPN_g}$, для l -го потоку; $v_{i,j}^g(k)$ – відносна вартість використання одиниці пропускної здатності каналу, представленого дугою $L_{i,j}^{VPN_g}$; $\gamma_{i,j}^g(k)$ – умовна вартість процесу перерозподілу пропускної здатності трактів передачі мережі сервіс-провайдера між каналами створюваних VPN-мереж на k -му інтервалі.

Використання критерію (24) дозволяє мінімізувати сумарні витрати на синтез однорангових VPN-мереж та їх функціонування з точки зору маршрутизації клієнтських потоків на деякому часовому інтервалі, який можна трактувати як інтервал прогнозування. Реалізація властивості прогнозування стану при управлінні VPN-мережами дозволяє більш гнучко перерозподіляти ресурси мережі сервіс-провайдера між створюваними віртуальними приватними мережами.

У цьому ж розділі модель (14)-(24) була адаптована для опису процесу синтезу оверлейних VPN, заснованих на тунелюванні трафіку.

Використання моделі дозволяє забезпечити більш ефективне управління ресурсами мережі провайдера при створенні віртуальних приватних мереж за рахунок більш повного врахування динаміки процесів інформаційного обміну, що протікають в ній. Запропоновані рішення адаптовані під різні моделі забезпечення якості обслуговування в створюваних VPN-мережах як під модель ізольованого каналу (pipe-модель), так і під розподілену модель (hose-модель), які підтримуються в рішеннях, заснованих на MPLS-технології.

У четвертому розділі вдосконалено метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем, який ґрунтується на розв'язанні оптимізаційних задач, сформульованих в рамках запропонованих в попередніх розділах математичних моделей. Метод забезпечує багатоетапність процесу оптимізації структурного та функціонального синтезу ТКС, забезпечуючи узгоджене розв'язання таких важливих задач, як розподіл капіталовкладень між етапами проектування, вибір топології транспортної мережі та пропускної здатності її трактів передачі, розподіл потоків на рівні транспортної мережі (маршрутизація) та доступу, визначення порядку підключення окремих абонентів і мереж доступу до вузлів транспортної мережі.

У розділі також здійснено дослідження запропонованого методу з оцінкою ключових показників ефективності процесу синтезу ТКС, в якості яких в залежності від особливостей постановки задачі виступали відносні сумарні витрати на синтез; прибуток від функціонування проектованої системи; результуюча пропускна здатність (максимальна продуктивність) створеної ТКС; сумарна інтенсивність трафіка, що отримав відмову в обслуговуванні та ін. За результатами розрахунків показано, що використання запропонованого методу дозволяє забезпечити більш ефективне використання наявного техніко-економічного ресурсу при проектуванні ТКС: підвищити пропускну здатність проектованої мережі (зменшити сумарну інтенсивність трафіка, що отримав відмову в обслуговуванні) в середньому від 14-18% до 28-37% в порівнянні з однокроковими методами при однакових об'ємах доступного при проектуванні техніко-економічного ресурсу; або зменшити в середньому від 12-15% до 20-26%, а в окремих випадках до 40-55%, об'єм коштів, що віділяються на синтез ТКС, в порівнянні з однокроковими методами при забезпеченні тієї ж пропускної здатності телекомунікаційної системи. У розділі показано, що метод є досить чутливим до точності прогнозування параметрів трафіка, що планується обслужити в рамках проектованої ТКС:

У розділі також наведено рекомендації щодо практичного використання запропонованих у роботі рішень.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка пов'язана з розробкою динамічних математичних моделей та методу структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем. За результатами розв'язання поставленої задачі можна зробити ряд важливих висновків.

1. Показано, що необхідний запас мережного ресурсу ТКС закладається саме на стадії її проектування, яке повинно ґрунтуватися на узгодженому рішенні взаємодоповнюючих один одного техніко-економічних завдань: розподіл капіталовкладень між етапами проектування та окремими створюваними трактами передачі; вибір топології і пропускних здібностей ТП; управління трафіком всередині і на кордоні транспортної мережі; забезпечення QoS та ін. Цього можна досягнути лише ґрунтуючись на використанні відповідних математичних моделей та методів, які формалізують аналізовані завдання з точки зору їх постановки і, що важливо, варіантів передбачуваного рішення.

2. Вперше запропоновано систему динамічних техніко-економічних моделей структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем, новизна яких полягає в тім, що для опису процесів перерозподілу капіталовкладень на різних етапах проектування ТКС та нарощування пропускних здатностей трактів передачі використано систему лінійних різницевих рівнянь, а для опису процесів маршрутизації та обмеження трафіка на границі транспортної мережі застосовано систему лінійних алгебраїчних рівнянь стану. Використання моделі дозволило забезпечити більш повне врахування техніко-економічних особливостей процесів структурно-функціонального синтезу ТКС.

3. Вперше запропоновано динамічну математичну модель структурно-функціонального синтезу віртуальних приватних мереж, новизна якої полягає в тому, що вона представлена як системою лінійних різницевих рівнянь для опису процесу перерозподілу пропускних здібностей трактів передачі між різними віртуальними приватними мережами, так і нелінійними алгебраїчними рівняннями для опису процесів маршрутизації і управління перевантаженням. Використання моделі дозволяє забезпечити більш ефективне управління ресурсами мережі провайдера при створенні віртуальних приватних мереж за рахунок більш повного врахування динаміки процесів інформаційного обміну, що протікають в ній.

4. Вдосконалено метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем, новизна якого полягає в тім, що він враховує багатоетапність процесу структурного та функціонального синтезу ТКС, забезпечуючи узгоджене розв'язання таких важливих задач, як розподіл капіталовкладень між етапами проектування, вибір топології транспортної мережі та пропускної здатності її трактів передачі, розподіл потоків на рівні транспортної мережі (мар-

шрутизація) та доступу, визначення порядку підключення окремих абонентів і мереж доступу до вузлів транспортної мережі.

5. Результати досліджень показали, що використання запропонованого методу дозволяє забезпечити більш ефективне використання наявного техніко-економічного ресурсу при проектуванні ТКС та синтезі як однорангових, так і оверлейних віртуальних приватних мереж.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сабурова С.А., Стерин В.Л. Методы обеспечения качества предоставления услуг в мобильных сетях четвертого поколения // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 148. – С. 46-53.

2. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 3 (5). – С. 8 – 17. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf.

3. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Оптимизация структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 9 (107). – С. 186-190.

4. Стерин В.Л., Вавенко Т.В., Еферов Д.М. Маршрутизация с балансировкой нагрузки по длине очереди на узлах телекоммуникационной сети // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ». – 2013. – №1 (977). – С. 45-49.

5. Вавенко Т.В., Стерин В.Л., Симоненко А.В. Потокковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди в программно-конфигурируемых сетях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 4. – С. 38-45.

6. Годованюк А.А., Стерин В.Л. Анализ динамической модели согласованного решения задач структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2013. – С. 384-386.

7. Стерин В.Л. Техничко-економічна модель багатетапного структурного і функціонального синтезу телекомунікаційної мережі [Електронний ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2013. – № 1 (10). – С. 3 – 12. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_sterin_design.pdf.

8. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Динамическое моделирование процессов структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // VIII Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні інформаційно-комунікаційні технології" – COMINFO'2012-Livadia. 1-5 жовтня 2012 р. –

Крим-Ялта-Лівадія: ДУІКТ, 2012. – С. 45.

9. Годованюк О.О., Лемешко О.В., Стерін В.Л. Математична модель погодженого розв'язання задач структурного та функціонального синтезу територіально-розподіленої телекомунікаційної мережі // Матеріали ІХ наукової конференції Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій "Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті", 22-23 листопада 2012 року. – К.: Видавництво ДУІКТ, 2012. – С. 70-71.

10. Лемешко О.В., Стерін В.Л., Годованюк О.О. Результати аналізу динамічної моделі структурного та функціонального синтезу транспортної телекомунікаційної мережі // Матеріали 67-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів. 5-7 грудня 2012 року. Ч.1: – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. – С. 39-41.

11. Lemeshko O., Sterin V. Design and structural-functional optimization transport telecommunication network // XIIth International Conference THE EXPERIENCE OF DESIGNING AND APPLICATION OF CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONICS, Polyana-Svalyava-(Zakarpattya), UKRAINE 19-23 February 2013: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. – P. 208-210.

12. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Динамическая модель структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // II-я Международная научно-техническая и научно-методическая конференция "Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании". Материалы конференции, сборник научных статей. – Санкт-Петербург, 26-27 февраля 2013. – С. 144-148.

13. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Структурная и функциональная оптимизация транспортной телекоммуникационной сети // Материалы 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013). В 2-х т. Севастополь, 8-13 сентября 2013 г. – Севастополь: Вебер, 2013. – Т.1. – С. 490-491.

14. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Математическая модель динамической реструктуризации транспортной телекоммуникационной сети // Материалы X Международной научно-технической конференции "Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ'2013". В 2-х томах. – Владимир, 26-28 июня 2013 г. – Том 1. – С. 163-167.

15. Патент на корисну модель 84986 Україна, МПК G06G 3/00 (2013.01). Спосіб маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах / О.В. Лемешко, Т.В. Вавенко, В.Л. Стерін, О.Ю. Євсєєва, С.В. Гаркуша; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2013 04667. Заявл. 15.04.2013, Опубл. 11.11.2013. Бюл. №21.

АНОТАЦІЯ

Стерін Вячеслав Леонідович. Динамічні моделі та метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі, пов'язаної з розробкою динамічних математичних моделей та методу структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем.

Розроблено систему динамічних техніко-економічних моделей та метод структурного і функціонального синтезу телекомунікаційних систем. В рамках моделей для опису процесів перерозподілу капіталовкладень на різних етапах проектування ТКС та нарощування пропускних здатностей трактів передачі використано систему лінійних різницевих рівнянь, для опису процесів маршрутизації та обмеження трафіка на границі транспортної мережі застосовано систему лінійних, а при врахуванні втрат пакетів – нелінійних алгебраїчних рівнянь стану. Метод забезпечує багатоетапну оптимізацію процесу структурного та функціонального синтезу ТКС, забезпечуючи узгоджене розв'язання таких важливих задач, як розподіл капіталовкладень між етапами проектування, вибір топології транспортної мережі та пропускної здатності її трактів передачі, розподіл потоків на рівні транспортної мережі (маршрутизація) та доступу, визначення порядку підключення окремих абонентів і мереж доступу до вузлів транспортної мережі. Використання запропонованих рішень на практиці дозволить підвищити ефективність процесу структурно-функціонального синтезу ТКС.

Ключові слова: синтез, топологія, система, мережа, трафік, потік, модель, метод, маршрутизація, оптимальність, пропускна здатність.

АННОТАЦИЯ

Стерин Вячеслав Леонидович. Динамические модели и метод структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи, состоящей в разработке динамических математических моделей и метода структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем.

В работе установлено, что традиционно в телекоммуникациях эффективность решения задач по обеспечению качества обслуживания во многом опре-

деляется объемом и, что немаловажно, доступностью сетевых ресурсов, в качестве которых, как правило, выступают разветвленная инфраструктура, пропускная способность трактов передачи, буферная емкость маршрутизаторов и др.. При этом необходимый запас сетевого ресурса закладывается именно на этапе проектирования ТКС, который должен основываться на согласованном решении следующих основных взаимодополняющих друг друга задач: определение местоположения и характеристик узлов транспортной ТКС; установление порядка подключения сетей доступа и (или) отдельных абонентов к приграничным узлам транспортной сети; выбор топологии транспортной сети; выбор пропускных способностей трактов передачи транспортной ТКС; распределение потоков в транспортной сети; перераспределение трафика, поступающего от сетей доступа, между несколькими приграничными узлами транспортной сети; ограничение трафика, поступающего от сетей доступа на приграничные узлы транспортной сети, ввиду невозможности его обслуживания с заданным уровнем QoS. При этом основными требованиями, предъявляемыми к перспективным решениям, являются как обеспечение максимальной согласованного решения частных (отдельных) технико-экономических задач структурного и функционального синтеза ТКС, так и учет многоэтапности (динамического характера) процесса проектирования в целом.

Впервые предложена система динамических технико-экономических моделей структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем (ТКС), новизна которых состоит в том, что для описания процессов перераспределения капиталовложений на различных этапах проектирования ТКС и наращивания пропускных способностей трактов передачи использована система линейных разностных уравнений, а для описания процессов маршрутизации и ограничения трафика на границе транспортной сети применена система линейных алгебраических уравнений состояния. Использование модели позволило обеспечить более полный учет технико-экономических особенностей процессов структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем.

Впервые предложена динамическая математическая модель структурно-функционального синтеза виртуальных частных сетей, новизна которой заключается в том, что она представлена как системой линейных разностных уравнений для описания процесса перераспределения пропускных способностей трактов передачи сети сервис-провайдера между различными виртуальными частными сетями, так и нелинейными алгебраическими уравнениями для описания процессов маршрутизации потоков и управления перегрузкой. Использование модели позволяет обеспечить более эффективное управление ресурсами сети провайдера при создании виртуальных частных сетей за счет более полного учета динамики процессов информационного обмена, протекающих в ней.

Усовершенствован метод структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем, новизна которого заключается в том, что он учитывает многоэтапность процесса структурного и функционального синтеза ТКС, обеспечивая согласованное решение таких важных задач, как распределение капиталовложений между этапами проектирования, выбор топологии транспортной сети и пропускных способностей ее трактов передачи, распределение потоков на уровне транспортной сети (маршрутизация) и доступа, определение порядка подключения отдельных абонентов и сетей доступа к узлам транспортной сети. Использование предложенного метода позволяет обеспечить более эффективное использование имеющегося технико-экономического ресурса при проектировании ТКС.

Ключевые слова: синтез, топология, система, сеть, трафик, поток, модель, метод, маршрутизация, оптимальность, пропускная способность.

ABSTRACT

Steriv Vyacheslav Leonidovich. Dynamic models and the method of synthesis of structural and functional telecommunication systems. – Manuscript. Dissertation for candidate's degree of technical in a specialty 05.12.02 – telecommunication systems and network. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2014.

The dissertation is devoted to the solution of actual scientific task associated with the development of dynamic mathematical models and methods for structural and functional synthesis of telecommunication systems.

A system of dynamic techno-economic models and methods for structural and functional synthesis of telecommunication systems (TCS) are developed. Within the models for description the process of redistribution of capital at different stages of the design and increase of TCS bandwidth links the system of linear difference equations is used, and in order to describe the process of routing and traffic restrictions on the boundary transport network used the system of nonlinear equations is used, and in calculating packet losses the system of nonlinear algebraic equations of condition is used. The method provides a multi-layered process optimization for structural and functional synthesis of TCS providing coordinated solving for such important problems as the allocation of capital between the stages of design, choice of transport network topology and capacity of transmission channels, the distribution of flows at the level of the transport network (routing) and access, determining the connectivity of individual users and network access to the transport network nodes. The use of proposed practical solutions will improve the efficiency of structural and functional synthesis in TCS.

Keywords: synthesis, topology, system, network, traffic, flow, model, method, routing, optimality, bandwidth.