

Срібна І.М. Державний університет телекомунікацій, Київ

Кучук Г. А. Національний технічний університет «ХПІ», Харків

Лебедєв О. Г. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Алнаєрі Фрхат Алі Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

СИНТЕЗ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ САМОВІДНОВЛЮВАНОВОГО ТА МАСШТАБОВАНОГО СЕГМЕНТА МЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Анотація: Запропоновано підхід до зниження завантаження магістральних каналів мережі передачі даних. Наукова новизна полягає в удосконаленні методу зниження завантаження магістральних каналів за рахунок синтезу топологічної структури її сегментів, котрі мають властивості локальної самовідновлюваності та масштабованості, причому відновлення сегмента та його масштабування відбуваються без виходу на магістральні канали основної мережі. Були вирішені такі завдання: сформована структура первинної регулярної мережі зв'язку, що припускає можливість самовідновлення; розроблений алгоритм формування вторинної мережі зв'язку локального сегмента на основі існуючої первинної регулярної мережі; сформульовані принципи локального масштабування; запропонований спосіб локального масштабування топологічної структури сегментів мережі передачі даних; проведений порівняльний аналіз завантаження магістральних каналів мережі передачі даних при використанні стандартного та запропонованого варіантів проведення синтезу її локальних складових. В якості початкової структури використаний регулярний граф із заданою зв'язністю. Подальші трансформації проводилися з використанням модифікованого методу комбінаторної оптимізації. Для масштабування сегмента використані топологічні особливості графа типу «сітка». При великій кількості вузлів комутації сегмента додаткове навантаження на магістральні канали зростає більш повільно при запропонованому підході, ніж при стандартному. Основні обчислювальні труднощі виникають при застосуванні методу невизначених множників Лагранжа. Тому розвиток даного дослідження може полягати у зменшенні обчислювальної складності алгоритму формування вторинної мережі зв'язку сегмента, що розглядається.

Ключові слова: первинна та вторинна мережі зв'язку, самовідновлюваність, локальний сегмент, магістральний канал, масштабованість.

Sribna I. State University of Telecommunications, Kyiv

Kuchuk H. National Technical University «KhPI», Kharkiv

Lebediev O. Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv

Alnaeri Frhat Ali National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava

SYNTHESIS OF THE TOPOLOGICAL STRUCTURE OF A SELF-HEALING AND SCALABLE DATA NETWORK SEGMENT

Abstract: An approach is proposed to reduce the load on the backbone channels of the data network. The scientific novelty lies in the improvement of the method for reducing the load of backbone channels by synthesizing the topological structure of its segments, which have the properties of local self-healing and scalability, and segment recovery and scaling occur without access to the backbone channels of the main network. The following tasks were solved: the structure of the primary regular communication network was formed, assuming the possibility of self-recovery; an algorithm for the formation of a secondary communication network of a local segment based on the existing primary regular network has been developed; the principles of local scaling are formulated; a method for local scaling of the topological structure of data transmission network segments is proposed; the comparative analysis of the load of the main channels of the data transmission network was carried out using the standard and the proposed variants of the synthesis of its local components. A regular graph with a given connectivity is used as the initial structure. Further transformations were carried out using a modified combinatorial optimization method. The topological

features of the "grid" type graph are used to scale the segment. With a large number of segment switching nodes, the additional load on the trunk channels increases with the proposed approach more slowly than with the standard one. The main computational difficulties arise when applying the method of indefinite Lagrange multipliers. Therefore, the development of this study may consist in reducing the computational complexity of the algorithm for forming a secondary communication network of the segment under consideration.

Keywords: primary and secondary communication networks, self-healing, local segment, backbone channel, scalability.

Срибна И.Н. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

Кучук Г. А. Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

Лебедев О. Г. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

Алнаэри Фрхат Али Национальный университет «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка», Полтава

СИНТЕЗ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ И МАСШТАБИРУЕМОГО СЕГМЕНТА СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Аннотация: Предложен подход к снижению загрузки магистральных каналов сети передачи данных. Научная новизна заключается в усовершенствовании метода снижения загрузки магистральных каналов за счет синтеза топологической структуры ее сегментов, которые имеют свойства локального самовосстановления и масштабируемости, причем восстановление сегмента и масштабирование происходят без выхода на магистральные каналы основной сети. Были решены следующие задачи: сформирована структура первичной регулярной сети связи, предполагающей возможность самовосстановления; разработан алгоритм формирования вторичной сети связи локального сегмента на основе существующей первичной регулярной сети; сформулированы принципы локального масштабирования; предложен способ локального масштабирования топологической структуры сегментов сети передачи данных; проведен сравнительный анализ загрузки магистральных каналов сети передачи данных при использовании стандартного и предложенного вариантов проведения синтеза ее локальных составляющих. В качестве исходной структуры использован регулярный граф с заданной связностью. Дальнейшие трансформации проводились с использованием модифицированного метода комбинаторной оптимизации. Для масштабирования сегмента использованы топологические особенности графа типа «сетка». При большом количестве узлов коммутации сегмента дополнительная нагрузка на магистральные каналы растет при предложенном подходе более медленно, чем при стандартном. Основные вычислительные трудности возникают при применении метода неопределенных множителей Лагранжа. Поэтому развитие данного исследования может заключаться в уменьшении вычислительной сложности алгоритма формирования вторичной сети связи рассматриваемого сегмента.

Ключевые слова: первичная и вторичная сети связи, самовосстанавливаемость, локальный сегмент, магистральный канал, масштабируемость.

1. Вступ

Експонентне зростання обсягу інформації, що створюється, оброблюється та передається сприяв бурхливому розвитку різноманітних мереж передачі даних. Найбільш завантаженими в таких мережах, зазвичай, є магістральні канали, тому актуальним стає завдання зниження їхнього навантаження. Одним із підходів для її вирішення є зменшення обсягів службової інформації, що надходять з локальних сегментів. Цьому сприяє наявність властивості самовідновлення та масштабованості сегментів, що можна передбачити у процесі синтезу даного сегмента. Особливу увагу при синтезі сегмента мережі передачі даних (СМПД) набуває розробка моделі на рівні «структура-функція», що може забезпечити раціональну побудову топологічної структури проєктованої мережі. СМПД може бути представлений графом G , який складається із множини вузлів i з'єднуючих їх дуг, причому обидва кінці кожної лінії з'єднані з вузлами i та j , $i, j = \overline{1, k}$, де k – загальна кількість вузлів графа G . Дуги і вузли в графі G нерівноцінні, дуга з'єднує 2 вузла, а до будь-якого з вузлів сходиться будь-яке число дуг, що визначають топологію мережі. Кожен маршрут СМПД визначається ланцюгом графа,

у котрому є вузол S – джерело та вузол t – приймач. Можливості самовідновлення мережі визначаються кількістю гілок, що з'єднують два вузли і не мають інших загальних вузлів, тобто в графі СМПД завжди існує з'єднує ланцюг для будь-якої пари вузлів. Це безпосередньо визначає живучість СМПД довільної топології.

Завдання топологічного проектування зводиться до знаходження раціональної топологічної структури, що задовольняє різним обмеженням при найменших витратах. Це завдання ставиться у теорії потоків, характерною особливістю якої є принципова неможливість вирішення більшості її постановок, так як при цьому не застосовуються методи комбінаторики і перебору варіантів через їхню численність і колосальну кількість варіантів топологічних структур K_o при заданій кількості вузлів комутації k :

$$K_o = \sum_{l=0}^{\ln} C_{l_n}^l = \sum_{l=0}^{\ln} \frac{l_n!}{l!(l_n-l)!}, \quad (1)$$

де $l_n = k(k-1)/2$ – кількість гілок повнозв'язної мережі.

Повнозв'язна структура є єдиною, яку можна побудувати при заданій кількості вузлів комутації в мережі передачі даних та проаналізувати аналітичними методами, наприклад, методами лінійного програмування, при виборі алгоритмів маршрутизації та вирішенні завдань розподілу потоків в мережі. Очевидно, що вирішити строго це завдання простим перебором всіх варіантів неможливо. Саме з цієї причини в даний час не існує єдиної методики синтезу оптимальної топологічної структури СМПД. Ще складніша справа в потокових моделях, оскільки загальна кількість потоків в кожній топологічній структурі величезна.

Аналіз, проведений в статті [1], показує, що відомі методи синтезу топологічної структури мереж або мережних сегментів орієнтовані на проектування новостворюваних мереж без урахування умов по використанню існуючих мережевих фрагментів. Крім того, слід враховувати, що при створенні відомчих мереж можуть використовуватися вузли комутації та типові канали передачі даних, одержувані у первинній мережі на умовах оренди.

При синтезі мереж без використання обхідних шляхів передачі інформації ці обставини можуть виявитися несуттєвими, тому що замість вартості прокладки незалежної лінії між кожною парою вузлів завжди можна використовувати вартість оренди найкоротшого шляху між цими вузлами по первинній мережі [2]. Однак організація прямих напрямків передачі даних між різними вузлами комутації по незалежних трасах більш кращі з точки зору надійності передачі даних. Тому при побудові вторинних мереж передачі даних велике значення має відповідний облік структури первинної мережі. Отже, в результаті синтезу необхідно отримати такі дані:

- перелік орендованих пучків каналів по вузлах первинної мережі із зазначенням їх каналної ємності і протяжності;
- трасування всіх орендованих пучків каналів по вузлах первинної мережі;
- загальну вартість орендної плати;
- оцінки надійності та живучості мережі.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Всі відомі точні методи вирішення такого завдання не можуть бути реалізовані на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки навіть для сегментів мереж передачі даних невеликої розмірності ($k > 50$), тому що необхідна кількість операцій експоненціально зростає із зростанням розмірності мережі. Тому використання точних методів розв'язання задачі синтезу структури СМПД [3] при існуючих можливостях ЕОМ обчислювальної техніки неможливо. Запропонована у [4-6] методика синтезу мережних сегментів орієнтована на аналіз Big Data та не припускає локального масштабування. Підходи до синтезу, запропоновані у [7-9], припускають локальне масштабування мережних фрагментів як вертикальне, так і горизонтальне, але не орієнтовані на побудову вторинної мережі зв'язку. Методика синтезу, розглянута у [10,11] орієнтована на вузькоспеціалізовані мережі, що орієнтовані на ідентифікацію поведінки користувачів. Низку методів синтезу, наведених у

[12], можна застосовувати лише при наявності у мережі фрактального або самоподібного трафіка. Аналогічні методи синтезу пропонуються і у [13] Для використання методики синтезу, запропонованої у [14], необхідно наявність оперативних емпіричних даних, що не відповідає наведеній вище постановці завдання. Отже на сьогодні існуючі методики синтезу локальних сегментів мережі передачі даних не орієнтовані на отримання топологічної структури, орієнтованої на наявність властивості самовідновлення та масштабованості даного сегмента, що, в свою чергу, є одним із актуальних питань при вирішенні проблеми зниження завантаження магістральних каналів мережі передачі даних.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є зниження завантаження магістральних каналів мережі передачі даних за рахунок розроблення методу синтезу топологічної структури її сегментів, котрі мають властивості локальної самовідновлюваності та масштабованості, причому відновлення сегмента та його масштабування відбуваються без виходу на магістральні канали основної мережі. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- сформувати структуру первинної регулярної мережі зв'язку, що припускає можливість самовідновлення;
- розробити алгоритм формування вторинної мережі зв'язку локального сегмента на основі існуючої первинної регулярної мережі;
- сформулювати принципи локального масштабування сегментів мережі передачі даних, що припускають можливість самовідновлення;
- запропонувати спосіб локального масштабування топологічної структури сегментів мережі передачі даних, що припускають можливість самовідновлення;
- провести порівняльний аналіз завантаження магістральних каналів мережі передачі даних при використанні стандартного та запропонованого варіантів проведення синтезу її локальних складових.

4.1. Формування структури первинної регулярної мережі зв'язку

Для вирішення завдання синтезу топологічної структури СМПД із властивістю локальної самовідновлюваності необхідно сформувати регулярний граф, що відповідає вимогам до даного сегмента та має відповідне до ступеню потрібної надійності значення регулярності.

Оптимальним в сенсі топології є граф Петерсона [15], ступінь кожного вузла такого графа дорівнює 3, а, отже, зв'язність його максимальна. Основна властивість даного графа пов'язано з його діаметром (максимальна відстань між будь-якою парою вузлів). Діаметр такого графа дорівнює 2. Однак граф діаметра 2 і зв'язності 3 не може містити більше 10 вузлів [15]. Той факт, що зв'язність графа не може бути більше його реберної зв'язності, означає, що мережа більш вразлива по відношенню до відмов вузлів, ніж каналів, так як відмова вузла викликає втрату всіх каналів, пов'язаних з ним. Регулярні графи представляють великий практичний інтерес при конструюванні комутаторів з однакових компонентів. Синтез регулярних графів базується на використанні Гамільтонова циклу для внутрішніх і зовнішніх контурів, які не мають спільних ліній. Регулярні структури задовольняють вимогу «обчислювальної ефективності» і можуть використовуватися в якості початкової структури для синтезу СМПД. Слід зазначити, що для будь-якої мережі із заданим числом вузлів існує обмежений набір регулярних структур необхідної зв'язності, які відрізняються лише порядком нумерації цих вузлів. При $l = l_n$ існує єдина регулярна структура на повному графі. Використання повної структури в якості моделі мережі спрощує рішення задачі оптимізації, оскільки в цьому випадку легко задовольнити всі запити користувачів, що задаються матрицею тяжіння, за рахунок прямих зв'язків між кожною парою кореспондуючих абонентів. Однак така структура практично завжди не задовольняє вимозі обмеженої вартості.

Використання повної структури в якості початкової, з наступним виключенням гілок в традиційній постановці з метою зниження вартості мережі, не призводить до позитивного результату через необхідність великої кількості обчислень. Тому для отримання початкової структури пропонується використовувати метод упорядкованого вилучення гілок з

отриманням регулярної початкової структури, що має діаметр і зв'язність не нижче необхідної. Якщо при цьому вартість мережі буде перевищувати задану, можна зробити подальше спрощення структури шляхом використання відомих методів комбінаторної оптимізації. Вимога до надійності мережі при застосуванні таких методів пред'являється у вигляді мінімально необхідної кількості обхідних шляхів передачі інформації між кожною парою вузлів, що тяжіють один до одного. Пропускна здатність гілок покладається незалежною від навантаження. В якості критерію оптимальності використовується загальна протяжність гілок мережі. Вибирається деяка початкова допустима структура, яка задовольняє вимозі надійності, що має певну вартість. Потім вихідна структура оптимізується послідовним застосуванням трансформацій з допустимою надійністю, що призводять до зниження вартості. Коли вичерпуються всі трансформації, то фіксується локально-оптимальна структура. Далі процедура повторюється для нової вихідної структури. СМПД, що має мінімальну вартість з усіх переглянутих локально-оптимальних структур, вважається рішенням завдання синтезу. Особливістю розглянутого алгоритму є те, що він заснований на евристичних міркуваннях і не гарантує отримання оптимальної структури сегмента. Крім того, розглянутий метод має цілу низку суттєвих недоліків:

- 1) не враховуються резерви пропускної здатності гілок;
- 2) відсутність урахування можливості оренди ліній у первинній мережі;
- 3) необхідність перегляду всіх локальних топологічних перетворень;
- 4) не враховуються вимоги до якості обслуговування запитів в мережі;
- 5) трансформовані топології в великій мірі залежать від вигляду цільової функції.

Інші відомі методи синтезу структури мереж та їх сегментів (наприклад, метод заміни гілок, увігнутий метод додавання гілок тощо) [15] не позбавлені перерахованих вище недоліків. Увігнутий метод вилучення гілок не дає можливості вводити в початкову структуру нові гілки, але генерує дуже широкий набір квазіоптимальних топологій, що є, швидше за все, його недоліком. Таким чином, всі перераховані методи або повторюють зазначені недоліки в різних комбінаціях, або додають нові. Наприклад, в структурі, синтезованої за увігнутим методом додавання гілок, пропускна здатність кожної гілки в точності дорівнює навантаженню, що проходить нею. Це означає, що при випадковому характері навантажень в реальних мережах, середній час обслуговування і довжина черг будуть суттєво збільшуватись, а ймовірність втрат може перевищити всі допустимі межі. Виходом з ситуації в даному випадку є одночасне збільшення пропускної спроможності кожної гілки, пропорційне кореню квадратному з навантаження, що надходить на неї [16]:

$$V_{i,j} = F_{i,j} + d\sqrt{F_{i,j}}, \quad i, j = \overline{1, k}, \quad (2)$$

де $V_{i,j}$ – пропускна здатність гілки; $F_{i,j}$ – потік тієї ж гілки; d – коефіцієнт пропорційності.

Це збільшення дозволить довести такий якісний показник, як середній час затримки, до будь-якого прийняттого рівня, однак, зазначимо, що немає гарантії, що синтезована структура залишиться оптимальною. Ці труднощі можна подолати, якщо завдання оптимізації вирішувати для кожної проміжної структури сегмента мережі. При цьому можна врахувати і інші якісні показники обслуговування, якщо використовувати відповідні оптимізаційні процедури. Завдання синтезу значно спрощується для ізотропної мережі, в якій завантаження каналів інваріантне до напрямку передачі інформації, а використання регулярних структур як початкових дає можливість вирішити завдання аналітично. Збільшення пропускної здатності зменшує середню затримку в мережі, але збільшує вартість, що є основною особливістю задачі оптимізації. Визначення допустимої середньої затримки \bar{T}_{don} вимагає аналізу складної системи масового обслуговування (СМО).

Середня кількість пакетів W , що знаходяться в мережі, визначається формулою Літтла

$$W = \gamma \bar{T}_{don}, \quad (3)$$

де γ – загальний трафік сегмента мережі (повне число пакетів в секунду).

З урахуванням інтенсивності кожного потоку λ_i і середньої затримки на кожній лінії t_i , формула (3) має такий вигляд:

$$W = \gamma \bar{T}_{\text{дон}} = \sum_{i=1}^l \lambda_i t_i. \quad (4)$$

Ймовірність втрат між ділянками сегмента мережі передачі даних визначається як

$$P_{\text{segt}} = 1 - \prod_{i=1}^j (1 - P_i), \quad (5)$$

де P_i – вектор втрат за викликами на i -й ланці обраного маршруту; j – кількість послідовно включених ланок до маршруту.

Однак запропонований метод не дозволяє розглядати СМПД як єдине ціле з урахуванням взаємодії всіх його елементів у процесі функціонування і, отже, не дає можливості отримати оптимальні значення пропускних здатностей всіх ланок сегмента, що забезпечують мінімальну середню затримку пакетів, яка також важлива для QoS, як і ймовірність втрат. Крім того, ланка моделюється у вигляді СМО з втратами. Моделюючи ланку як М/М/п, отримуємо ймовірність відмови в обслуговуванні (зайнятості всіх n каналів) за формулою Ерланга [16]:

$$P_{\text{відм}} = \frac{1}{n!} \cdot (\lambda/\mu)^n / \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!} (\lambda/\mu)^i, \quad (6)$$

де величина λ/μ трактується як щільність трафіку, яка вимірюється в ерлангах, тобто є відносним часом зайнятості каналу за одну годину.

Ряд публікацій [4, 17] присвячений оптимізації пропускних здатностей СМПД базується на моделі мережі у вигляді СМО типу М/М/1 з необмеженою чергою, тобто діє припущення, що на вхід i -ої черги надходить пуасонівський потік пакетів з інтенсивністю λ_i пакетів в секунду, а час обслуговування розподілений за експонентним законом із параметром μ , тобто середня затримка для цієї черги є такою

$$T_i = 1/(\mu V_i - \lambda_i). \quad (7)$$

Використання виразів (2) – (7) дозволить сформувати структури первинної регулярної мережі зв'язку на основі регулярного графа, котру можна розглядати як початковий варіант для проведення синтезу СМПД з заданими вимогами. Отже, в якості початкової структури можна використовувати побудований регулярний граф із заданою зв'язністю.

4.2. Алгоритм формування вторинної мережі зв'язку локального сегмента

Для реалізації самовідновлення сегментів мережі передачі даних необхідно мати обхідні шляхи передачі інформації. Ці шляхи можна отримати, сформувавши вторинну мережу зв'язку. Дані мережі зв'язку базуються на одній і тій же фізичній структурі сегменту, але мають різні топології віртуальних каналів зв'язку. Щоб перейти до синтезу вторинної мережі, необхідно привести тяжіння між абонентами до тяжіння між вузлами комутації.

Після цього завдання синтезу СМПД може бути сформульована в наступному вигляді:

На деякій території задано розташування k вузлів комутації між якими необхідно організувати обмін потоками інформації, що відповідає матриці тяжінь $\|\lambda_{i,j}\|, i, j = \overline{1, k}$. Є вимога до якості допустимої величини середньої затримки $\bar{T}_{\text{дон}}$ та рівню відмов в обслуговуванні $P_{\text{нотр}}$. Також необхідно передбачити наявність декількох незалежних маршрутів передачі інформації між кожною парою вузлів S і t , яким в матриці тяжіння відповідає ненульовий елемент, щоб ймовірність зв'язності цих вузлів була не менше заданої. Потрібні канали можуть бути виділені з первинної мережі, причому вартість оренди і

залежність надійності каналу від відстані відомі. Потрібно побудувати вторинну мережу передачі даних, що задовольняє перерахованим вище вимогам при мінімальній вартості її реалізації. У разі великих навантажень початкова ефективність використання каналів виявляється досить великою, тому їх об'єднання не призводить до позитивного результату, так як приріст ефективності компенсується збільшенням вартості.

Таким чином, для вирішення першого часткового завдання спочатку доцільно організувати прямі пучки каналів по найкоротших шляхах між вузлами комутації, які сильно тяжіють один до одного, щоб виключити можливість перенасичення інших каналів транзитними потоками інформації. Ці пучки каналів наносяться на карту первинної мережі передачі даних. Якщо отримана в результаті топологічна структура буде істотно відрізнятися від початкової регулярної структури, то необхідно здійснити її подальше перетворення з використанням, наприклад, відомих методів заміни, наведених в статті [1], з метою максимального наближення до реальних можливостей первинної мережі. Найбільш доцільно для цієї мети використовувати метод комбінаторної оптимізації, розглянутий у попередньому підрозділі, оскільки в цьому випадку найбільш просто задовольнити вимогу по надійності при мінімальній вартості мережі. Як допустима початкова структура, що задовольняє вимозі щодо зв'язності, може бути використана регулярна топологічна структура з заданим числом вузлів графа і відповідним розташуванням на карті первинної мережі. Заміні підлягають ті гілки, які в отриманій структурі відсутні, і прокладка яких не може бути здійснена.

Розглянемо рішення задачі синтезу структури СМПД в наведеній вище постановці з використанням модифікованого методу комбінаторної оптимізації, якщо відомо число k і місце розташування вузлів комутації і задані навантаження між кожною парою (i, j) вузлів комутації в вигляді наведеної матриці навантажень $\|F_{i,j}\|$. Підлягає оптимізації середній час затримки \bar{T}_{don} , що визначається з формули (3):

$$\bar{T}_{don} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j=1}^k N_{i,j}, \quad (8)$$

де γ – загальний трафік у мережі; $N_{i,j}$ – кількість повідомлень на вході гілки (i, j) .

У найпростішому випадку системи масового обслуговування (СМО) типу М/М/1 з використанням (7) отримуємо:

$$\bar{T}_{don} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j=1}^k \frac{F_{i,j}}{V_{i,j} - F_{i,j}} \rightarrow \min, \quad (9)$$

де $V_{i,j}$ – пропускна здатність гілки (i, j) .

Як обмеження використовуємо сумарну вартість всіх гілок, яку представимо в такому вигляді:

$$D = \sum_{i,j}^k (z_{i,j} a_{i,j} + b_{i,j} F_{i,j}) \leq D_{nomp},$$

де $z_{i,j} = 1$, якщо між вузлами $i, j \in$ гілка, та $z_{i,j} = 0$, якщо між цими вузлами гілка відсутня; $a_{i,j}, b_{i,j}$ – фіксовані коефіцієнти пропорційності.

Складаємо функціонал оптимізації:

$$\Phi = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j=1}^k \frac{F_{i,j}}{V_{i,j} - F_{i,j}} + P \sum_{i,j=1}^k (z_{i,j} a_{i,j} + b_{i,j} F_{i,j}).$$

Використовуючи метод невизначених множників Лагранжа і обчислюючи значення

часткових похідних $\frac{\partial \Phi}{\partial F_{i,j}} = 0$, отримуємо оптимальні значення потоків в кожній гілці:

$$F_{i,j} = V_{i,j} - d \sqrt{V_{i,j}}, \quad (10)$$

$$d = \left(\sum_{i,j=1}^k (z_{i,j} a_{i,j} + b_{i,j} V_{i,j}) - D_{номп} \right) / \left(\sqrt{b_{i,j}} \sum_{i,j=1}^k \sqrt{b_{i,j} V_{i,j}} \right).$$

При цьому мінімальний середній час затримки з урахуванням (8) – (10) визначається таким виразом:

$$\bar{T}_{зад}^{\min} = \frac{k}{\gamma d} \left(-1 + \frac{1}{k} \sum_{i,j=1}^k \sqrt{V_{i,j}} \right). \quad (11)$$

Таким чином, вдасться встановити залежність пропускних здатностей гілок від навантаження і врахувати показник якості – середній час затримки. Надалі робота алгоритму не змінюється, і пошук допустимих трансформацій здійснюється в тій же послідовності, поки не буде знайдена локально-оптимальна структура мережі. Дана топологічна структура має первинну та вторинну мережі зв'язку, відповідає висунутим обмеженням щодо вартості оренди каналів, може самовідновлюватися за рахунок сформованої вторинної мережі зв'язку. Перейдемо до розгляду можливості локального масштабування сегменту, що розглядається, без задіяння ресурсів головної мережі.

4.3. Принципи локального масштабування сегментів мережі передачі даних

У статті [1] показано, що СМПД, який синтезується, повинен задовольняти вимозі локальної масштабованості, що дозволяє в залежності від конкретного випадку застосування стискати, або розширювати структуру сегмента в будь-якому напрямку, а при необхідності обмежуватися розгортанням тільки цього сегмента, або поєднанням його з декількома іншими локальними компонентами. При цьому структура СМПД і його масштаб визначаються великою кількістю різних факторів, основними з яких є географічне розміщення абонентів, інформаційні потоки між ними, вимоги до надійності і якості обслуговування і економічні обмеження.

У великомасштабних мережах визначальними виявляються потоки, що формуються в центральній зоні, де зосереджені центри управління, і які створюють сильно виражене тяжіння з периферією, де розташовані керовані об'єкти. Отже, в структурі територіальної мережі повинні бути передбачені досить потужні напрямки передачі даних між магістральними та зональними вузлами комутації. Таким чином, магістральні вузли комутації повинні мати сильну зв'язність, щоб забезпечити обмін інформацією між віддаленими зонами з мінімальною кількістю транзитних напрямків. Для забезпечення тяжіння між прилеглими зонами необхідно мати прямі зв'язки з сусідніми зональними вузлами. Ці ж зв'язки можуть використовуватися для підвищення надійності обміну інформацією, так як дозволяють організувати обходи в разі відмови окремих магістральних напрямків. Значно важче організувати взаємодію між окремими зональними компонентами сегмента мережі передачі даних, побудованими на різних принципах. Якщо в першому випадку (моногеність) така взаємодія може здійснюватися безпосередньо через аналогічні вузли комутації з реалізацією загальних процедур інформаційного обміну, то в другому випадку (гетерогеність) для сполучення повинні використовуватися спеціальні програмно-апаратні засоби (шлюзи), що забезпечують перетворення і узгодження інтерфейсів, форматів даних, принципів адресації і інформаційного обміну, а також реалізацію процедур маршрутизації та контролю за доведенням повідомлень до адресата, що є абонентом іншої складової сегмента.

Таким чином шлюзові елементи мережі можуть забезпечувати сумісність різних структурних елементів мережі, що відрізняються протоколами. Залежно від розмірів території, що обслуговується, необхідної кількості вузлів комутації в кожній із зон для обслуговування

зонального і загального навантаження, мережа з адаптивною передачею даних може мати багаторівневу ієрархічну структуру, що звільняє дорожчі канали великої протяжності вищих рівнів від перенасичення їх транзитними потоками інформації шляхом використання їх лише для міжзонального обміну. При великих розмірах СМПД з адаптивною передачею даних окремі його ділянки, обмежені порівняно невеликими розмірами регіону, необхідно створювати на основі структури з повністю розподіленими функціями комутації. Перенесення такого підходу на весь сегмент не виправдано ускладнює його структуру, збільшуючи вимоги до зв'язності, що принципово веде до зростання розмірності розв'язуваної задачі управління потоками, і призводить до різкого збільшення числа ділянок, а, отже, і до часу доставки повідомлень. Отже, використовуючи наведені принципи, перейдемо до опису способу проведення локального масштабування.

4.4. Масштабування топологічної структури сегментів мережі передачі даних

Аналіз, поведений в [10] показує, що найкращим рішенням, яке задовольняє перерахованим вище вимогам, є топологічна структура типу «сітка», тобто чарункова структура. Елементарною моделлю мережі передачі даних розміром в одну чарунку є чотирьохвузловий повнозв'язний граф (рис. 1, а). Діагональні елементи такої чарунки є основою для нарощування структури мережі у «ширину» (рис. 1, б).

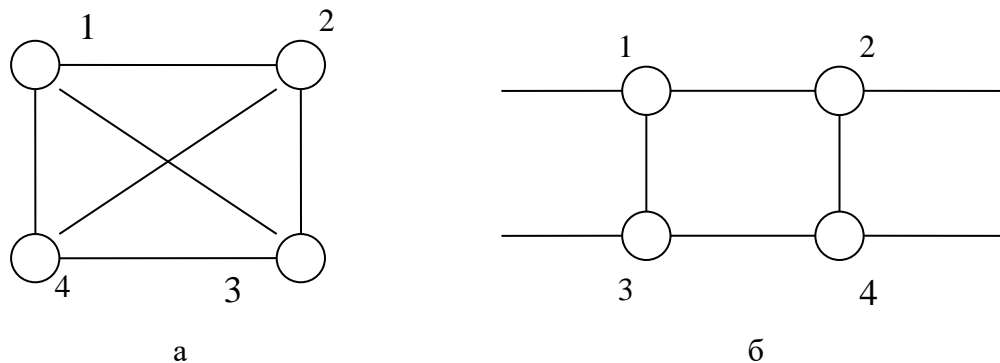


Рис. 1. Елементарна чарунка мережі передачі даних:
а – модель чарунки; б – нарощування структури мережі

Визначимо зв'язність графа як максимальне число ліній, розрив яких не призводить до втрати властивості його зв'язності. Для елементарної чарунки мережі передачі даних, наведеної на рис. 1, а, зв'язність графа $p=2$. Очевидно, що для формування подібної структури будь-якої протяжності «в ширину» ділянка мережі передачі даних, що розглядається, повинна містити парну кількість вузлів, тобто $k=2\Theta$, де Θ – кількість пар вузлів, що використовуються для нарощування структури мережі у «ширину».

Така структура може бути отримана перетворенням повнозв'язного графа в регулярний граф методом упорядкованого вилучення гілок, що утворюють зовнішній гамільтонів цикл, кількість яких дорівнює кількості вузлів k повнозв'язного графа, так що зв'язність отриманого графа буде такою: $p_{per} = p - 2$, де p – зв'язність вихідного повнозв'язного графа.

Якщо вихідна структура містить досить велику кількість вузлів, то для переходу до чарункової структури необхідно виключити ті гілки, що утворюють кілька гамільтонових циклів, тому $k - 1 - 2v = 3$, тобто $v = (k - 4)/2$, де v – кількість виключених гамільтонових циклів. Наприклад, при десятивузловій повнозв'язній мережі, кількість виключених гамільтонових циклів складе $v = (10 - 4)/2 = 3$.

Загальна кількість гілок, що містяться в отриманому регулярному графі, визначається таким чином:

$$N_c = \frac{k(k-1)}{2} - vk = \frac{k(k-1)}{2} = \frac{3}{2}k.$$

Діаметр отриманого графа дорівнює Θ , тобто кількості пар вузлів, що використовуються для нарощування структури мережі у «ширину». У загальному випадку отриманий регулярний граф пористої структури при довільній кількості вузлів k вихідного графа має вигляд, представлений на рис. 2.

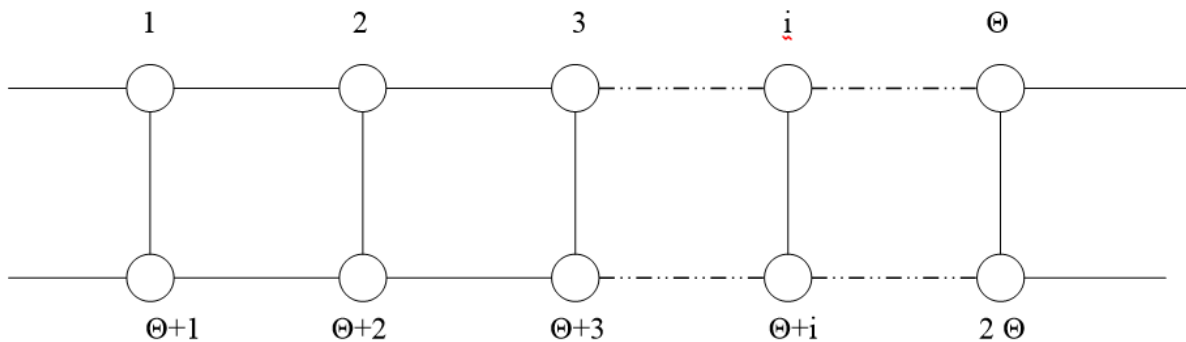


Рис. 2. Регулярний граф, що має чарункову структуру з k вузлами

Для отримання кінцевої структури типу «сітка» необхідно провести нарощування структур в «глибину», як це показано на рис. 3.

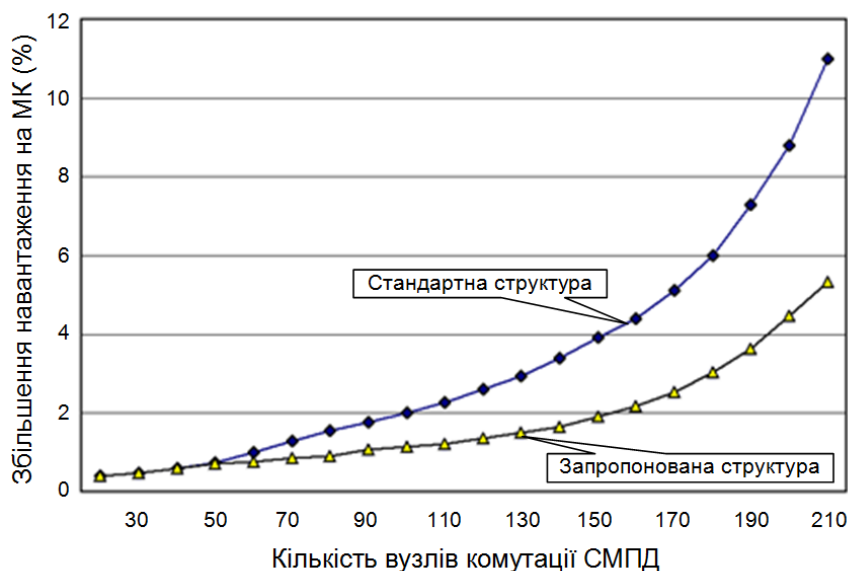


Рис. 3. Залежність додаткового навантаження на магістральні канали від кількості вузлів комутації та структури СМПД

З огляду на ієрархічний принцип побудови мережі, введемо відповідні позначення, перша цифра якого визначає номер рівня структури, а друга цифра – номер вузла на кожному рівні ієрархії. Отримана в результаті регулярна структура має зв'язність $p = 3$. Міжзональний обмін здійснюється через спеціальні шлюзи, які здійснюють узгодження різних за ідеологією фрагментів мережі. Для отримання однорідної структури в мережі можуть бути організовані потужні горизонтальні і вертикальні напрямки, що зв'язують кінцеві вузли мережі передачі даних, що знижує діаметр отриманої структури. Зазначимо, що якщо в кінцевій структурі окремі напрямки передачі інформації не можуть бути здійснені, то структура може прийняти вигляд «невірної решітки». Аналіз такої структури може бути виконаний з використанням модифікованого методу комбінаторної оптимізації.

5. Обговорення результатів проведеного дослідження

Основним завданням дослідження було зниження завантаження магістральних каналів

мережі передачі даних. Це було досягнуто за рахунок спеціального підходу до синтезу топологічної структури локальних сегментів, в результаті дані сегменти отримали властивості локальної самовідновлюваності та масштабованості. Основний вигравш відбувається при спотвореннях локальних сегментів або при проведенні масштабування їхньої фізичної структури в глибину або в ширину. На рис. 3 наведені результати моделювання завантаження магістральних каналів (МК) розподіленої регіональної мережі передачі даних з двома варіантами проведення синтезу її локальних складових: стандартним та запропонованим.

З рис. 3 бачимо, що при кількості вузлів комутації локального сегмента мережі передачі даних, що перевищує 200, додаткове навантаження на МК знижується в середньому в 2 рази. Отримані результати пояснюються тим, що у випадках спотворення та проведення масштабування сегментів кількість службової інформації, що повинна по магістральних каналах до центрів управління мережею, суттєво зменшується. Основна особливість запропонованого методу в порівнянні з існуючими – можливість локального самовідновлення і локального масштабування. Обмеження, притаманне запропонованому підходу: чим більшою є децентралізація головної мережі, тим менший вигравш буде від його застосування. Основні обчислювальні труднощі виникають при застосуванні методу невизначених множників Лагранжа для сегментів з великою кількістю вузлів комутації. Тому розвиток даного дослідження може полягати у зменшенні обчислювальної складності алгоритму формування вторинної мережі зв'язку СМПД.

6. Висновки

У статті запропонований метод синтезу топологічної структури самовідновлюваного та масштабованого сегмента мережі передачі даних. На його основі удосконалений метод зниження завантаження магістральних каналів за рахунок суттєвого зменшення виходу на магістральні канали основної мережі при спотвореннях та масштабуванні сегмента. При розробці метода було вирішено низку важливих завдань. Сформована структура первинної регулярної мережі зв'язку, що припускає можливість самовідновлення. В якості початкової структури для проведення її оптимізації обраний регулярний граф із заданою зв'язністю. Розроблений алгоритм формування вторинної мережі зв'язку локального сегмента на основі існуючої первинної регулярної мережі. Сформульовані принципи локального масштабування. Запропонований спосіб локального масштабування топологічної структури сегментів мережі передачі даних. Також проведений порівняльний аналіз завантаження магістральних каналів мережі передачі даних при використанні стандартного та запропонованого варіантів проведення синтезу її локальних складових. При великій кількості вузлів комутації сегмента додаткове навантаження на магістральні канали зростає більш повільно при запропонованому підході, ніж при стандартному.

Отже, наукова новизна полягає в удосконаленні методу зниження завантаження магістральних каналів за рахунок синтезу топологічної структури її сегментів, котрі мають властивості локальної самовідновлюваності та масштабованості, причому відновлення сегмента та його масштабування відбуваються без виходу на магістральні канали мережі.

Напрямом подальших досліджень є зменшення обчислювальної складності алгоритму формування вторинної мережі зв'язку сегмента.

References

1. Shefer, O.V. and Alnaeri, Frhat Ali (2020), "Optimum flow distribution in the network with adaptive data transfer", *Electronics and Control Systems*, No. 4(66), pp.45-50.
2. Fang, Shuguang; Dong, Yuning and Shi, Haixian (2012), "Approximate Modeling of Wireless Channel Based on Service Process Burstiness", *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*; Athens: 1-7. Athens: The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing, (WorldComp).
3. Sobieraj M., Stasiak, M and Weissenberg, J. (2012), "Analytical model of the single threshold mechanism with hysteresis for multi-service networks", *IEICE Transactions on*

Communications, Vol. E95.B No. 1, pp. 120–132.

4. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E. and Svyrydov A., Kharchenko V. (2019), “Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model and Method”, In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Springer, Cham.

5. Mashkov O.A., Sobchuk V.V., Barabash O.V., Dakhno N.B., Shevchenko H.V. and Maisak T.V. (2019), “Improvement of variational-gradient method in dynamical systems of automated control for integro-differential models”. *Mathematical Modeling and Computing*. Vol. 6. No. 2. P. 344 – 357.

6. Barabash O.V., Dakhno N.B., Shevchenko H.V. and Majsak T.V. (2017), “Dynamic Models of Decision Support Systems for Controlling UAV by Two-Step Variational-Gradient Method”. Proceedings of 2017 IEEE 4th International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)”, October 17-19, 2017, Kyiv, Ukraine. National Aviation University. P. 108 – 111.

7. Kurose, J. and Ross, K. (2017), *Computer networking: a top-down approach*, 7th ed., Harlow: Pearson, 864 p.

8. Barabash O.V., Bodrov S.V. and Musienko A.P. (2014), “Analysis of the construction of a network of video surveillance of customs observation posts based on a functionally stable system”. *Scientific and practical journal "Communication"*. Issue 2. P. 8 – 11.

9. Mashkov O.A. and Barabash O.V. (2005), “Assessment of functional stability of distributed information and control systems”. *Physical and mathematical modeling and information technology: Collection of scientific works. Lviv, Center for Mathematical Modeling of the Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics named after Ya.S. Pidstryhach of the NAS of Ukraine*. Issue. 1. P. 159 – 165.

10. Ruban, I.V., Martovytskyi, V.O., Kovalenko, A.A. and Lukova-Chuiko, N.V. (2019), “Identification in Informative Systems on the Basis of Users' Behaviour”, *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019-September*, 9019446, pp. 574-577.

11. Barabash O.V. Durniak B.V., Mashkov O.A., Obidin D.M. (2012), “Ensuring the functional stability of complex technical systems”. *Modeling and information technology: Coll. Science*. Kyiv, Institute of Modeling Problems in Energy named after G. Pukhov NAS of Ukraine. Is. 64. P. 36 – 41.

12. Chen Y.G. and Feng J. (2012). “Fractal-based exponential distribution of urban density and self-affine fractal forms of cities”, *Chaos, Solitons & Fractals*, 45(11): 1404-1416.

13. Kuchuk, N., Mozhaiev, O., Mozhaiev, M. and Kuchuk, H. (2017), “Method for calculating of R-learning traffic peakedness”, *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017 – Proceedings*, pp. 359-362.

14. Vapnik V. (1987), *Estimation of Dependences based on Empirical Data*, Springer-Verlag, N.-Y., Berlin, 326 p.

15. Semenov, S., Sira, O., Kuchuk, N. (2018), “Development of graphicanalytical models for the software security testing algorithm”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 2, No 4 (92), pp. 39-46.

16. Silverman B.W. (1988), “Choosing the window width when estimating a density”, *Biotechnika*, Vol. 65, No 1, pp. 1 – 11.

17. M. Piccioniab and M. Romaab (1990), “Stochastic regularization of linear equations and the realization of Gaussian fields”, *Journal of Multivariate Analysis*, Volume 33, Issue 1, April 1990, Pages 143-150.