

УДК 621.391

Климаш М. М., докт. техн. наук, проф. (Тел.: +380 (50) 431 98 07. E-mail: mklimash@lp.edu.ua)

Кайдан М. В., канд. техн. наук, доц. (Тел.: +380 (32) 258 24 14. E-mail: kaidan_k@mail.ru)

Бешлей М. І., аспірант (Тел.: +380 (93) 710 32 44. E-mail: beshleyi@gmail.com)

Редька А. В., студент (Тел.: +380 (32) 258 24 14)

(Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ IP/MPLS/DWDM ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ДІАКОПТИКИ

Климаш М. М., Кайдан М. В., Бешлей М. І., Редька А. В. Оптимізація багатошарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики. Поданий математичний апарат для оптимізації багатошарової транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики. Запропоновано підхід, що мінімізує сумарний час затримки в мережі й усуває недоліки існуючих методів. Проведено апробацію методики оптимізації запропонованої моделі багатошарової структури із забезпеченням необхідної якості обслуговування одночасно на всіх рівнях досліджуваної мережі з використанням методу діакоптики. Здійснено аналіз затримки в транспортних мережевих вузлах та шляхах при передаванні агрегованого трафіку. Представлений підхід дозволяє збалансувати навантаження по всіх маршрутах для уникнення простою та перенавантажень у мережі.

Ключові слова: IP/MPLS/DWDM мережа, транспортна мережа, діакоптика, багатошарова структура, агрегований трафік, перенавантаження мережі

Климаш М. Н., Кайдан Н. В., Бешлей Н. И., Редька А. В. Оптимизация многослойной структуры транспортной сети на основе технологий IP / MPLS / DWDM с помощью метода диакоптики. Приведен математический аппарат для оптимизации многослойной транспортной сети на основе технологий IP/MPLS/DWDM с помощью метода диакоптики. Предложен подход, который минимизирует суммарное время задержки и устраняет недостатки существующих методов. Проведена апробация методики оптимизации предложенной модели многослойной структуры с обеспечением требуемого качества обслуживания одновременно на всех уровнях исследуемой сети с использованием метода диакоптики. Осуществлен анализ задержки в транспортных сетевых узлах и путях при передаче агрегированного трафика. Представленный подход позволяет сбалансировать нагрузку по всем маршрутам, чтобы избежать простоя и перегрузок в сети.

Ключевые слова: IP/MPLS/DWDM сеть, транспортная сеть, диакоптика, многослойная структура, агрегированный трафик, перегрузка сети

I. Вступ

Під час проектування телекомунікаційних систем необхідно враховувати їх складну багаторівневу архітектуру, в якій рівні технологічної ієрархії є накладеними мережами, що використовують різні технології. При цьому логічному зв'язку на верхньому рівні ієрархії в загальному випадку можуть відповідати кілька альтернативних шляхів на більш низькому рівні. Особливо гостро ця проблема постає, коли при вирішенні задач синтезу необхідно зокрема визначити фізичні та логічні зв'язки між елементами на різних рівнях системи, забезпечивши при цьому сумісність різних телекомунікаційних технологій.

Для зниження складності математичних моделей з метою отримання аналітичного розв'язку необхідно використовувати методи декомпозиції. У статті представлено два різних підходи для вирішення задач оптимізації транспортної мережі, як багатошарової телекомунікаційної структури. Один з яких передбачає використання методу діакоптики, для оптимізації багатошарової транспортної мережі з врахуванням впливу шарів один на одного. А інший представляє транспортну мережу в широких межах якої можна коректувати структурні характеристики і, отже, суттєво змінювати її топологію з урахуванням потокового навантаження.

На сьогодні актуальним є поєднання технологій IP/MPLS/DWDM [1]. Технологія IP/MPLS у поєднанні з DWDM дозволяє об'єднати всі переваги використання технологій DWDM та MPLS в одній мережі, а саме:

1) Більш висока швидкість просування IP-пакетів по мережі за рахунок скорочення часу обробки маршрутної інформації.

2) Можливість організації інформаційних потоків в каналах зв'язку. За допомогою міток кожному інформаційному потоку (наприклад, несучого телефонний трафік) може призначатися необхідний клас обслуговування (CoS). Потоки з більш високим CoS отримують пріоритет перед усіма іншими потоками. Таким чином, за допомогою MPLS забезпечується якість обслуговування (QoS), притаманна мережам SDH і ATM.

3) Повне відокремлення один від одного віртуальних корпоративних мереж за рахунок створення для кожної з них своєрідних тунелів.

4) Прозорий пропуск через ядро IP/MPLS трафіку протоколів Ethernet, FrameRelay або ATM, що дозволяє підключати користувачів, що використовують всі ці різноманітні протоколи.

5) Технологія DWDM дозволяє розширити пропускну здатність мережі без заміни попередньо встановленого обладнання.

Оскільки, сучасні глобальні мережі є складними не лише для опису, але й для представлення, тому пропонується розглядати топологію таких мереж за допомогою багатопшарових структур (Рис. 1) [3]. Кожен із шарів відповідає технології, яка в ньому використовується. Між шарами існують логічні, фізичні та функціональні зв'язки.

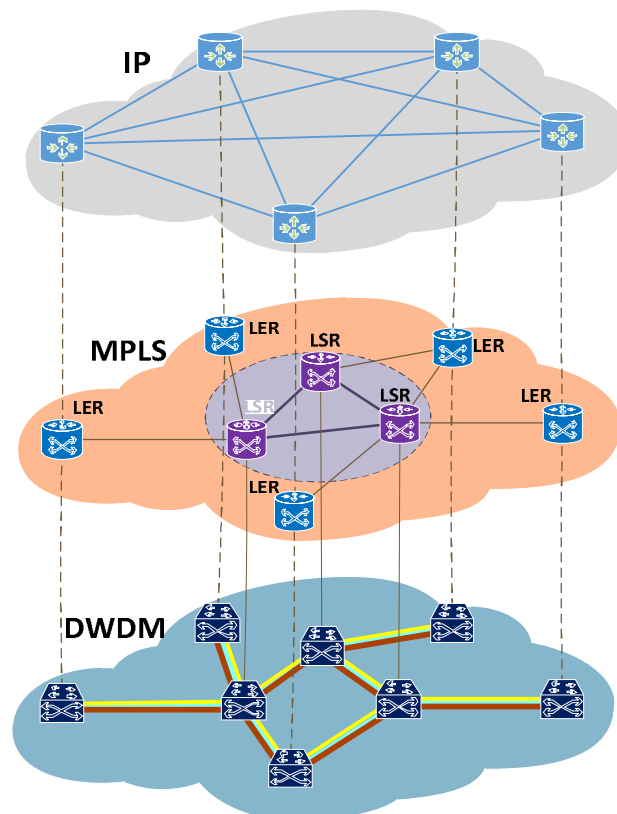


Рис. 1. Структурна схема транспортної мережі IP/MPLS/DWDM

Однак не вирішеними залишаються проблеми впровадження та розвитку багатопшарової транспортної мережі із застосуванням нових алгоритмів оптимізації з врахуванням сумісності різних телекомунікаційних технологій. Тому метою даної статті є оптимізація складних багатопшарових структур транспортних мереж на основі технологій

IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики, що дає змогу досягти оптимального розподілу інформаційних потоків та забезпечити необхідну якість обслуговування на всіх рівнях багатошарової структури транспортної мережі IP/MPLS/DWDM.

II. Алгоритм розрахунку багатошарових структур методом діакоптики

IP/MPLS мережа повинна забезпечувати транспортне обслуговування для всіх вимог, навіть у разі будь-якої одиничної помилки.

З точки зору планування мережі IP/MPLS, мережі можуть виникати неузгодженості під час накладання незалежних шарів мережі. У цьому випадку механізми відновлення зберігаються в кожному шарі і, отже, відсутні механізми відновлення шарів. З цієї причини, в IP/MPLS шарі повинен бути передбачений вузол і резервний віртуальний канал щоб запобігти виникненню збоїв.

Спільний багатошаровий підхід, для розгляду мережі IP/MPLS/DWDM забезпечує необхідну живучість через організований прошарок для відновлення схеми, який зводить до мінімуму час затримки та ймовірність блокувань у IP/MPLS вузлах. Модель для спільного підходу оптимізує і IP/MPLS і DWDM шари одночасно додаючи додаткові ємності для подолання будь-якого одиничного відмови. Вона поєднує в собі вузол-посилання і формулювання дуги траєкторії відповідно для маршрутизації та планування IP/MPLS мережі й маршрутизації даного набору попередньо обчислених оптичних шляхів у DWDM. Вимоги до IP/MPLS формуються віртуальною топологією, де кожен віртуальний канал, розділений на кілька каналів, збирає ряд вимог і транспортується по одному світловоду в DWDM рівні.

Перед оптимізацією потрібно врахувати множину маршрутів, які з'єднують вузли між собою, та визначити найкращі шляхи (між вузлами) з усіх можливих. У Табл. 1 представлені найоптимальніші маршрути між всіма вузлами (у нижній половині комірки), а також записане значення навантаження, яке поступає на кожен із вузлів (у верхній половині комірки).

Оптимальні маршрути між вузлами

Табл. 1

	A	B	C	D	E	Σ
A	X	2 Гбіт	3 Гбіт	1 Гбіт	4 Гбіт	10
		AFB	AFHC	AFHD	AFE	Гбіт
B	4 Гбіт	X	1 Гбіт	2 Гбіт	2 Гбіт	9
	BGFA		BGC	BGHD	BFE	Гбіт
C	3 Гбіт	3 Гбіт	X	1 Гбіт	1 Гбіт	8
	CHFA	CGB		CHD	CHE	Гбіт
D	4 Гбіт	2 Гбіт	2 Гбіт	X	3 Гбіт	11
	DHFA	DHEB	DHC		DHE	Гбіт
E	5 Гбіт	1 Гбіт	3 Гбіт	2 Гбіт	X	11
	EHFA	EFB	ENC	END		Гбіт
Σ	16 Гбіт	8 Гбіт	9 Гбіт	6 Гбіт	19 Гбіт	X

Цей підхід полягає в тому, щоб перетворити методом діакоптики багатошарову транспортну мережу на основі технології IP/MPLS/DWDM на набір ізольованих рівнів, з'єднаних між собою, які утворюють множину J [3].

Топологічна модель, яка досліджується, представлена у формі багаторівневої структури, подана на Рис.1. У статті розглядаємо приклад оптимізації рівня MPLS за критерієм часу затримки. Відповідно до методу діакоптики рівень MPLS поділяється на три ізольовані підмережі (Рис. 2).

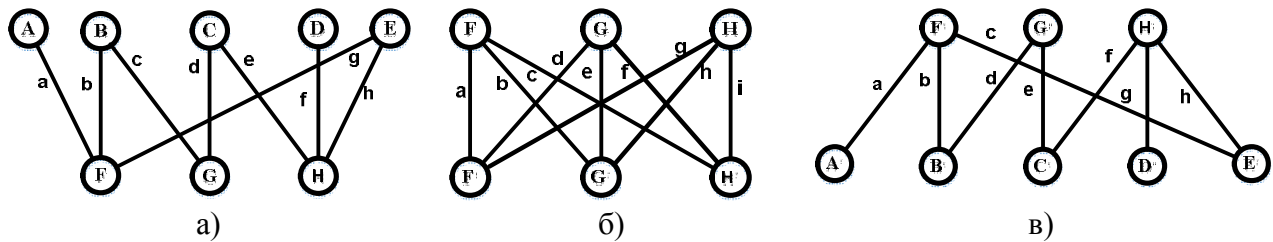


Рис. 2. Розділення на три ізольовані підмережі: а) підмережа Ingress LSR – Intermediate LSR; б) ядро MPLS (Intermediate LSR); в) підмережа Intermediate LSR – Egress LSR

Для розрахунку багаторівневих структур задається фізична система та записуються її рівняння стану у символьній формі. Оскільки критерієм оптимізації є час затримки, то завдання зводиться до розв'язку системи рівнянь (1), де вектори \mathbf{H}_i та \mathbf{L}_{ij} задані, а вектор \mathbf{T}_j невідомий :

$$\mathbf{T}_j = \mathbf{H}_i \mathbf{L}_{ij}^{-1}. \quad (1)$$

На початковому етапі розв'язку задачі, методом розділення, задана тільки фізична система , а розв'язку рівняння (1) відсутні.

Етап перший. Розчленування моделі.

Нехай модель розділяється на три ізольовані підмережі, як показано на Рис. 2. У свою чергу кожна ізольована підмереж ділиться на дві підсистеми (Рис. 3).

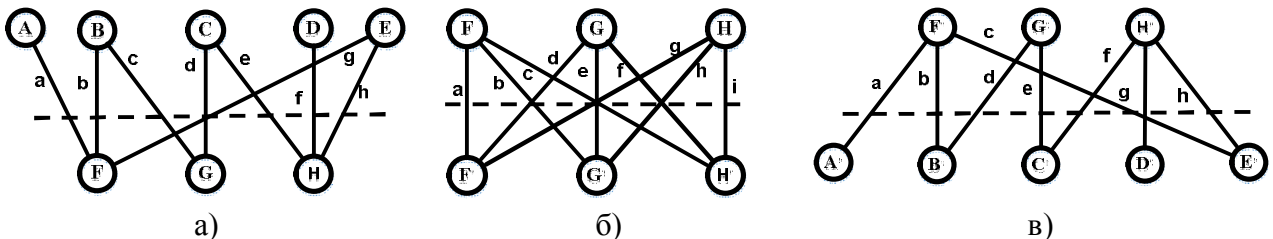


Рис. 3. Розчленування підмереж: а) Ingress LSR – Intermediate LSR; б) ядро MPLS (Intermediate LSR); в) Intermediate LSR – Egress LSR

Відділення частин повинне бути настільки повним, що їх взаємодія має бути виключена. Важливо, щоб між підсистемами не існувало незв'язних компонентів.

Другий етап. Видалення розділених зв'язків.

У підсистемах не залишається ніяких зв'язків з іншими підсистемами, по яких можна було б визначити, як вони були пов'язані один з одним, тобто передбачається, що розділені гілки не належать ні до однієї з n підсистем початкової системи. Оскільки ними не можна нехтувати, їх слід віднести до додаткової $n+1$ -ої підсистеми, яку треба ще побудувати.

Найбільш очевидна перевага видалення зв'язків між структурами полягає в тому, що невідомі затримки для структури \mathbf{J}_2 , не будуть додатковими невідомими для кожної підсистеми \mathbf{J}_1 . Таким чином, кількість невідомих в кожній підсистемі суттєво зменшується.

Третій етап – отримання і розв'язання рівняння (2) для кожної підмережі.

Розглянемо виведення і розв'язання рівняння підсистеми для першої підмережі A-B-C-D-E, F-G-H (Рис. 3,а), які відносяться для підсистеми J_1 .

Четвертий етап полягає в отриманні і розв'язанні рівнянь системи, що називається колом перетинів. Коли початкова система розділяється на n підсистем J_1 , можна вважати, що кожна з них з N навантаженнями після розв'язання утворює N -мірний абстрактний простір (в нашому випадку, згідно з Рис.3 $N=5$ та $N=3$). Ці N -мірні простори в початковій з'єднаній системі не будуть незалежними один від одного, а будуть перетинатися або накладатися.

Оскільки $(n+1)$ -а система перетинів (структура J_2) відіграє центральну роль у методі розділення, виділяємо чотири стадії її побудови:

1) З повних схем підсистем виділяються лише ті фрагменти, які важливі для взаємодії з іншими підсистемами. Для цих фрагментів записується спрощена матриця обернених пропускних здатностей $F^{l'} = L_{ij}'$, яка є основою для побудови "опорного" кола перетинів:

$$F^{l'} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E & F & G & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \end{matrix} & \begin{vmatrix} 250 & -69 & 386 & 185 & -287 & 250 & -108 & -93 \\ -69 & -22 & -156 & 58 & 76 & 23 & 244 & -29 \\ 386 & -156 & 522 & -250 & -238 & -129 & 103 & 125 \\ 185 & 58 & -250 & 844 & -204 & -62 & 16 & 78 \\ -287 & 76 & -238 & -204 & 204 & 96 & -67 & 102 \\ 250 & 23 & -129 & 62 & 96 & -83 & 36 & 31 \\ -108 & 244 & 103 & 16 & -67 & 36 & -79 & -8,149 \\ -93 & 29 & 125 & 78 & -102 & 31 & 8,149 & -39 \end{vmatrix} \end{vmatrix} 10^{-3}. \quad (3)$$

Перехід від матриці F^l до $F^{l'}$ може бути здійснений за допомогою матриці перетворення C_l :

$$C_1 = \begin{vmatrix} C_1^{(1)} \\ C_1^{(2)} \end{vmatrix}, \quad C_1^{(1)} = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}, \quad C_1^{(2)} = \begin{matrix} & \begin{matrix} F & G & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} F \\ G \\ H \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}, \quad (4)$$

де $C_1^{(1)}$, $C_1^{(2)}$ – матриці перетворення переходу матриці F^l першої та другої підсистеми J_1 , відповідно.

За допомогою (4) можна отримати:

$$F^{l'} = C_{1r} F^l C_1. \quad (5)$$

2) Видалені зв'язки відновлюються, але без пропускної здатності.

Відновлення ліній зв'язку здійснюється за допомогою матриці C_2 , яка відповідає за кількість зв'язків, приєднаних до вузла. Вона дозволяє відновити лінії зв'язку в тому вигляді, в якому вони були після розподілу, але до їх видалення.

$$C_2 = D \begin{matrix} & \begin{matrix} a' & b' & c' & d' & e' & f' & g' & h' & a'' & b'' & c'' & d'' & e'' & f'' & g'' & h'' \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (6)$$

3) Фрагменти підсистем об'єднуються і утворюють "опорну" систему перетинів f' . Об'єднання підсистем виконується за допомогою матриці C_3 (Рис. 2).

$$C_3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & d & e & f & g & h \end{matrix} \\ \begin{matrix} a' \\ b' \\ c' \\ d' \\ e' \\ f' \\ g' \\ h' \\ a'' \\ b'' \\ c'' \\ d'' \\ e'' \\ f'' \\ g'' \\ h'' \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (7)$$

Маючи три перетворюючі матриці, можемо з їх допомогою отримати матрицю з'єднаної системи f з "опорної" матриці кола перетинів F^I , двома різними способами.

У першому методі краще почати із зменшеної матриці підсистеми і використовувати тільки дві перетворюючі матриці:

$$C_{23} = C_2 C_3. \quad (8)$$

Перетворюючи примітивну матрицю $F^{I'}$, на основі якої будується матриця кола перетинів, маємо:

$$f' = (C_{23})_I F^{I'} C_{23}. \quad (9)$$

де f' – матриця, яка описує опорне коло перетинів.

Виконавши операції отримаємо:

$$f' = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & d & e & f & g & h \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{matrix} & \begin{vmatrix} 323 & 83 & 718 & 445 & -564 & 559 & -50 & -223 \\ 389 & -26 & 698 & 69 & -440 & 204 & 405 & -34 \\ 887 & -276 & 638 & 404 & -604 & -296 & 467 & 298 \\ 469 & 37 & -215 & 1236 & -441 & -156 & 69 & 382 \\ -231 & 205 & -730 & 453 & 402 & 77 & -90 & 273 \\ 121 & 93 & -371 & -249 & 497 & -40 & -3,288 & 125 \\ -128 & 367 & 561 & 354 & -243 & 376 & -30 & -177 \\ -330 & 285 & -14 & -93 & 436 & 110 & -126 & 47 \end{vmatrix} \end{vmatrix} 10^{-3}. \quad (10)$$

Другий метод знаходження матриці виконується одним підходом, використовуючи добуток трьох матриць :

$$C = C_1 C_2 C_3. \quad (11)$$

Матриця C має нульові елементи в тих рядках, які відповідають змінним, що не відносяться до ліній зв'язку. Проте, ці елементи мають бути включені в матрицю, щоб її розміри відповідали розмірам матриці F_1 , на яку матриця C повинна множитися і в якій є відповідні елементи.

Таким чином, матриця f' для "опорного" кола перетинів може бути обчислена за формулою:

$$f' = C_1 F^1 C. \quad (12)$$

4) Вводяться пропускні здатності видалених раніше гілок; таким чином остаточно формується матриця F .

Відновлення розділених гілок. Далі потрібно буде використовувати розділені гілки і їх діагональну матрицю пропускних здатностей, що відповідає підсистемі J_2 :

$$l = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b & c & d & e & f & g & h \end{matrix} \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{matrix} & \begin{vmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{vmatrix} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Кінцева стадія полягає в об'єднанні "опорного" кола перетинів і розділених гілок. Якщо матрицю l просто додати до матриці f' (стежачи, звичайно, за тим, щоб розташування рядків і стовпців в матрицях було узгодженим), отримаємо для матриці обернених пропускових здатностей F повного кола перетинів наступний вираз:

$$F = f' + l = C_l F^l C + l^{-1} \quad (14)$$

$$F = 10^{-3} \begin{pmatrix} 656 & 83 & 718 & 445 & -564 & 559 & -50 & -223 \\ 389 & 474 & 698 & 69 & -440 & 204 & 405 & -34 \\ 887 & -276 & 888 & 404 & -604 & -296 & 467 & 298 \\ 469 & 37 & -215 & 2236 & -441 & -156 & 69 & 382 \\ -231 & 205 & -730 & 453 & 735 & 77 & -90 & 273 \\ 121 & 93 & -371 & -249 & 497 & 460 & -3,288 & 125 \\ -128 & 367 & 561 & 354 & -243 & 376 & 304 & -177 \\ -330 & 285 & -14 & -93 & 436 & 110 & -126 & 247 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Просте збільшення розділених гілок матриці l може бути завжди виконане навіть в найскладніших типах з'єднань, оскільки кількість рядків і стовпців в матриці F дорівнює кількості розділених гілок.

Перетворення матриці F . Матриця F має кількість рядків і стовпців, рівну кількості розімкнених контурів. Якщо матриця F такого ж порядку, що і L_{ij} для підсистем, її зворотну матрицю легко обчислити:

$$L' = F^{-1}. \quad (16)$$

Матриця, зворотна матриці (15) має вигляд :

$$L' = 10^{-3} \begin{pmatrix} 1080 & 931 & 327 & -639 & 1995 & -794 & -1260 & -1015 \\ 263 & 2209 & -823 & -77 & 963 & -1050 & -1248 & 228 \\ 935 & -685 & 855 & -792 & 1275 & -1367 & 553 & 617 \\ 441 & -458 & 238 & -59 & 1065 & -720 & 508 & -312 \\ 1422 & -602 & 1184 & -1661 & 4161 & -2094 & 425 & -906 \\ -434 & -819 & -346 & 839 & -2461 & 2579 & 964 & 729 \\ -1416 & 0,447 & 586 & 1,407 & -27 & 1151 & 1577 & -1409 \\ -1686 & -91 & -113 & 1733 & -4247 & 2946 & -394 & 2907 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

III. Методика розрахунку матриці значень часових затримок

Відповідно до алгоритму [2] для розрахунку складних електричних кіл пропонуються основні кроки для знаходження часових затримок для розглянутої підмережі.

Постановка завдання:

1) Задані матриці L' , F^l і C телекомунікаційної системи, що складається із $n+1$ підсистем.

2) У вихідній системі задані значення навантаження у Гбіт:

$$H = \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \end{matrix} \begin{vmatrix} 10 \\ 9 \\ 8 \\ 11 \\ 11 \\ 13 \\ 10 \\ 26 \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Оскільки, навантаження на вузлах підсистеми \mathbf{J}_1 є різним, то спостерігається процес балансування та розподілення потоків, при цьому загальний час затримки при передачі пакетів дорівнюватиме часу затримки у вузлах ізольованих підсистемах \mathbf{J}_1 та гілках.

3) Необхідно знайти вектор T значень часових затримок у вузлах вихідної системи. Для оптимізації усі розрахунки подано у транспонованому вигляді.

Вектор, який одержується на кожному етапі обрахунку, має відповідний фізичний зміст, а саме:

1) $T_1 = F^t H$ — час затримки передачі пакетів в ізольованих підсистемах, при заданому навантаженні H на вузлах.

$$T_1^t = \begin{vmatrix} 3.605 & 1.32 & 3.865 & 8.813 & -0.863 & 2.132 & 0.854 & 1.094 \end{vmatrix}. \quad (19)$$

2) $t = -C_1 T_1$ — час затримки передачі пакетів в перерізі \mathbf{j} .

$$t^t = \begin{vmatrix} -1.474 & 0.811 & -0.466 & -3.011 & 2.771 & -7.719 & 2.994 & 1.956 \end{vmatrix}. \quad (20)$$

3) $h = L^t t$ — навантаження, що проходить через \mathbf{J}_2 .

$$h^t = \begin{vmatrix} -4.221 & 4.168 & 9.931 & 2.563 & 6.003 & -11.161 & -5.039 & -9.216 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

4) $H^t = C h$ — додаткове навантаження в підсистемах \mathbf{J}_1 , що виникає за рахунок навантаження у зв'язках між підсистемами \mathbf{J}_2 .

$$(H^t)^t = \begin{vmatrix} -4.221 & 14.099 & 8.566 & -11.161 & -14.256 & 5.092 & -12.494 & 14.375 \end{vmatrix}. \quad (22)$$

5) $T_2 = F_1 H^t$ — час затримки передачі пакетів у вузлах, внаслідок взаємодії з додатковим навантаженням системи \mathbf{J}_2 .

$$T_2^t = \begin{vmatrix} 4.577 & -6.443 & 6.675 & -8.021 & 2.393 & -2.933 & 6.602 & -1.57 \end{vmatrix}. \quad (23)$$

6) $T = T_1 + T_2$ — результуюче значення величини часу затримки передачі пакетів в об'єднаній системі.

$$T^t = \begin{vmatrix} 8.183 & -5.122 & 10.54 & 0.791 & 1.53 & -0.801 & 7.456 & -0.476 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Для визначення загального часу затримки, який витрачається на обробку навантаження у вузлах транспортної мережі та на проходження його по маршруту, користуємось формулою (25):

$$T_{1II} = T_{B1} + T_{\Gamma} + T_{B2}. \quad (25)$$

де T_{B1} — час затримки у вхідному вузлі;

T_{Γ} — час затримки у гілці, що з'єднує вхідний і вихідний вузол;

T_{B2} — час затримки у вихідному вузлі.

Розрахунок часу затримки для ядра MPLS (Intermediate LSR, Рис. 2,б) та підмережі Intermediate LSR – Egress LSR (Рис. 2,в) проводиться аналогічним чином, як першої під мережі.

Після проведення розрахунків часу затримки для трьох ізольованих підмереж визначаємо сумарний час затримки для наскрізного проходження навантаження через всю транспортну мережу, користуючись формулою (26):

$$T = T_{1П} + T_{2П} + T_{3П} \quad (26)$$

де $T_{1П}$, $T_{2П}$, $T_{3П}$ – часи затримок у першій, другій та третій підмережах, відповідно.

Розраховані значення сумарного часу затримки (T_{Σ}) та часу затримки на вузлах (T_B) і гілках (T_r) мережі, для кожного з попередньо обраних оптимальних маршрутів, представлено у Табл. 2.

Розраховані значення часових параметрів мережі Табл. 2

	A	B	C	D	E
A	X	AFB	AFHC	AFHD	AFE
		$T_B=0.128$ $T_r=-5.646$ $T_{\Sigma}=-5.518$	$T_B=33.616$ $T_r=-3.875$ $T_{\Sigma}=29.741$	$T_B=14.197$ $T_r=7.335$ $T_{\Sigma}=21.532$	$T_B=-10.482$ $T_r=-0.859$ $T_{\Sigma}=-11.341$
B	BGFA	X	BGC	BGHD	BFE
	$T_B=29.844$ $T_r=-14.687$ $T_{\Sigma}=15.157$		$T_B=22.797$ $T_r=-2.715$ $T_{\Sigma}=20.082$	$T_B=9.749$ $T_r=7.752$ $T_{\Sigma}=-17.501$	$T_B=-23.787$ $T_r=-1.568$ $T_{\Sigma}=-25.355$
C	CHFA	CGB	X	CHD	CHE
	$T_B=16.805$ $T_r=-11.924$ $T_{\Sigma}=4.881$	$T_B=23.815$ $T_r=2.774$ $T_{\Sigma}=26.589$		$T_B=17.321$ $T_r=5.622$ $T_{\Sigma}=22.943$	$T_B=12.579$ $T_r=2.321$ $T_{\Sigma}=15.08$
D	DHFA	DHEB	DHC	X	DHE
	$T_B=13.098$ $T_r=-20.482$ $T_{\Sigma}=-7.385$	$T_B=1.878$ $T_r=-10.75$ $T_{\Sigma}=-8.872$	$T_B=28.14$ $T_r=-9.253$ $T_{\Sigma}=18.887$		$T_B=14.369$ $T_r=-1.344$ $T_{\Sigma}=13.025$
E	EHFA	EFB	ENC	EHD	X
	$T_B=11.405$ $T_r=-10.807$ $T_{\Sigma}=0.598$	$T_B=-6.925$ $T_r=-1.178$ $T_{\Sigma}=-8.103$	$T_B=26.447$ $T_r=0.422$ $T_{\Sigma}=26.869$	$T_B=6.62$ $T_r=11.632$ $T_{\Sigma}=18.252$	

Оскільки, під час вибору оптимальних шляхів не враховувалась взаємодія між ними, тому необхідно перевірити чи не виникає затримок через зайнятість маршруту передачі. Визначаємо між якими вузлами мережі навантаження передається з найбільшою затримкою (Табл. 2), обираємо для з'єднання цих вузлів інший шлях, та повторно розраховуємо сумарний час затримки у мережі. Для даного випадку найгірший час затримки (див. таблиця 2) між вузлами А-С. Для проведення оптимізації мережі необхідно розглянути всі можливі шляхи між вузлами А-С, визначити сумарний час затримки та обрати найкращий маршрут.

Цей процес повторюємо доти, поки час затримки в мережі не буде мінімальним.

Даний підхід дозволяє не тільки визначити оптимальні шляхи для передачі навантаження між кінцевими вузлами, але й збалансувати навантаження по всіх маршрутах для уникнення простою та перенавантажень у мережі.

IV. Висновки

Запропоновано альтернативний підхід, що мінімізує сумарний час затримки в мережі й усуває недоліки існуючих методів. Поданий математичний апарат для оптимізації багатошарової транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики.

Представлено багатошарову транспортну мережу, як множину ізольованих підмереж, які з'єднані між собою. Обчислено сумарний час затримки для мережі MPLS та проведено аналіз отриманих результатів, що враховує взаємодію між оптимальними шляхами.

На базі запропонованої моделі проведено апробацію та представлено методику оптимізації багатошарової структури із забезпеченням необхідної якості обслуговування одночасно на всіх рівнях досліджуваної мережі з використанням методу діакоптики.

Література

1. Крон Г. Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – Москва : Сов. радио, 1978. – 719 с.
2. Стрихалюк Б. М. Тензорне подання топологічних структур тороїдальних мереж / Б. М. Стрихалюк, М. М. Климаш, М. В. Кайдан // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіoeлектроніка та телекомунікації. – 2008 р. – №618. – С.138-145.
3. Климаш М. М. Використання інваріантності тензора для моделювання телекомунікаційних мереж / М. М. Климаш, Б. М. Стрихалюк, М. В. Кайдан // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». – 2008. – Вип. 49. – С.72-79.
4. Климаш М. М. Тензорна модель характеристик мультисервісного трафіку в NGN мережах / М. М. Климаш, Б. М. Стрихалюк, М. В. Кайдан // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – 2009. – №22. – С.37-43.
5. Климаш М. М. Тензорний аналіз переходу транспортної мережі в NGN / М. М. Климаш, Б. М. Стрихалюк, М. В. Кайдан // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – 2009. – №21. – С. 126-139.
6. Кайдан М. В. Оптимізація багатошарових телекомунікаційних мереж за критеріями якості надання сервісу / М. В. Кайдан, М. І. Бешлей, А. В. Редька // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій, Львів, 30 жовтня – 2 листопада 2014 р. – С. 81-84.
7. Klymash M. Traffic routing in telecommunication nets and its diakoptics representation / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan, I. Demydov // Computational Problems of Electrical Engineering / Lviv Politechnic National University. – 2011. – V.1, №1. – P. 15-19.

Дата надходження в редакцію: 14.04.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. О. Скопа