

УДК 621.396.2; 621.394.6

Касьян С. П. (Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ НЕПРЯМОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Касьян С. П. Оптимізація пропускної здатності інфокомунікаційної мережі з використанням методу непрямой оптимізації. У статті розглядається метод непрямой оптимізації з метою вирішення задачі оптимізації пропускної здатності ліній зв'язку інфокомунікаційних мереж майбутнього.

Ключові слова: ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, ОПТИМІЗАЦІЯ, МЕТОД КРАМЕРА

Касьян С. П. Оптимизация пропускной способности инфокоммуникационной сети с использованием метода непрямой оптимизации. В статье рассматривается метод косвенной оптимизации с целью решения задачи оптимизации пропускной способности линий связи инфокоммуникационных сетей будущего.

Ключевые слова: ИНФОКОММУНИКАЦИОННАЯ СЕТЬ, ОПТИМИЗАЦИЯ, МЕТОД КРАМЕРА

Kasian S.P. Optimization of throughput of info of a communication network with use of a method of indirect optimisation. In article the method of indirect optimisation for the purpose of the decision of a problem of optimisation of throughput of communication lines of infocommunication future networks is considered.

Keywords: INFOCOMMUNICATION NETWORK, OPTIMIZATION, KRAMER'S METHOD

Вступ. Оптимальне управління – це задача проектування системи, що забезпечує для заданого об'єкта управління або процесу закон управління або управлінську послідовність впливів, які забезпечують максимум або мінімум заданої сукупності критеріїв якості системи [1].

Для забезпечення оптимального управління інфокомунікаційною мережею необхідно визначити такі показники ефективності системи управління мережею, які б задовольняли оптимальному стану мережі у будь-який момент часу.

Зважаючи на те, що зараз важко уявити якою точно буде інфокомунікаційна мережа майбутнього, спираючись на Рекомендації МСЕ можна допустити, що мережа майбутнього буде глобальною інформаційною інфраструктурою (ГІ), яка об'єднуватиме в собі вже існуючі інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) з урахуванням компонентів, які тільки плануються до впровадження, з єдиним центром управління ГІ та здатна надавати повний спектр телекомунікаційних послуг (у будь-якому географічному місці, з гарантованою якістю, за прийнятною вартістю і в будь-який момент часу) на базі інноваційних технологій.

В Рекомендаціях МСЕ зазначено, що мережі майбутнього мають забезпечувати: *можливість* впровадження послуг, не вимагаючи, наприклад, істотного додаткового розгортання і збільшення експлуатаційних витрат; *оптимізовану* архітектуру для обробки великих обсягів даних у розподіленому середовищі та можливість користувачам, незалежно від їх місцеположення, безпечного, простого, швидкого і точного доступу до необхідних даних; *мінімальний* вплив на навколишнє середовище при проектуванні архітектури, та експлуатації мережі майбутнього (витрати матеріалів та енергоспоживання, зниження викидів парникових газів та зниження впливу на навколишнє середовище, що чиниться іншими секторами і т.п.); *зниження* бар'єрів для входу різних учасників мережевої екосистеми та зниження вартості життєвого циклу, для того щоб вони були придатними для розгортання і стійкими [2].

За даними Cisco з 2012 р. по 2017 р. мобільний трафік зростає у середньому на 66% (рис. 1) [3]. Зважаючи на ці дані, виконання Рекомендації МСЕ щодо інфокомунікаційних мереж майбутнього ставить перед інженерами завдання щодо вирішення проблем пошуку оптимальних варіантів побудови інфокомунікаційних мереж майбутнього.

З інфокомунікаційними мережами майбутнього ситуація поки виглядає доволі невизначено. У публікаціях все частіше з'являються

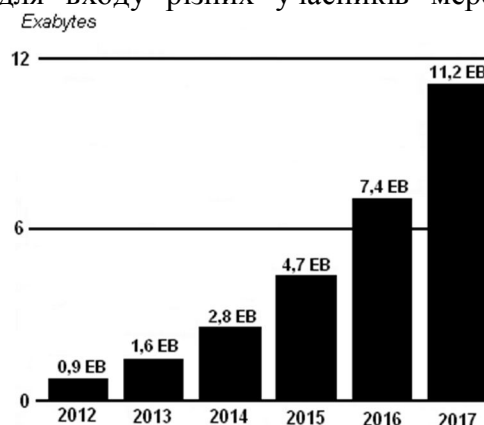


Рис. 1. Зростання мобільного трафіку за прогнозами Cisco

скептичні думки, щодо проблем з частотним ресурсом [4]. Як відомо, до останнього часу кожне нове покоління мереж мобільного зв'язку несло з собою істотне розширення робочої смуги частот. У мережах першого покоління (NMT) вона становила не більше 30 кГц; в мережах другого (GSM) – вже близько 200 кГц; в мережах 3G (IMT-2000 і UMTS) могла доходити до 5 МГц; в мережах 4G, починаючи з Mobile WiMAX і LTE – до 40 МГц.

Водночас подальший рух у цьому напрямку, тобто розширення смуги частот ще на порядок, уже неможливий, що і стало однією із рекомендацій МСЕ. Сказане означає, що якщо раніше перехід до мобільних мереж нового покоління щоразу супроводжувався значним зростанням фізичної швидкості передачі даних, то у випадку з інфокомунікаційними мережами майбутнього розраховувати на це уже не доводиться. Пікова швидкість передачі даних понад 1 Гбіт/с (навіть в напрямі спадання) для мереж майбутнього поки ніким не запропоновано. Мережі, в яких цей показник здатний досягати символічного бар'єру в 1 Гбіт/с, Міжнародний союз електрозв'язку відносить до мереж 4G.

Оптимізація пропускної здатності мережі. У статті розглядається метод непрямой оптимізації з метою вирішення задачі оптимізації двох змінних, одна з яких може використовуватися, як вихідні дані.

Цей метод є найбільш ефективним у випадку, коли функція, що досліджується не містить екстремуму, але є опуклою. Тоді може бути проведена її умовна оптимізація. Отримані аналітичні залежності, дозволяють визначити середній мінімальний час затримки пакету і здійснити обґрунтований вибір пропускних здатностей ліній зв'язку при існуючій матриці тяжіння потоків вузлів мережі. Використання метода умовної оптимізації у цій задачі вирішує проблему вибору виду функції, що зв'язує незалежні змінні умовою у вигляді об'єктивно існуючого взаємозв'язку між змінними, що оптимізуються.

На мережевому рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем виділимо основний показник мережі – середній час затримки пакету $\bar{T}_{\text{затр}}$ і визначимо для моделі мережі М/М/1 середній мінімальний час затримки $\bar{T}_{\text{затр}}^{\min}$ пакета, використовуючи оптимізатор потоків F . За вихідні дані візьмемо пропускні здатності V ліній зв'язку та рівняння зв'язку функції виду $\psi(\bar{F}) = 0$, тобто: $\bar{T}_{\text{затр}}^{\min} = \min \bar{T}_{\text{затр}}(V, F)$; $\psi(\bar{F}) = 0$, де \bar{F} – значення потоків в магістральних лініях, пов'язані певною залежністю.

Для мереж зв'язку з комутацією пакетів постійної довжини L (наприклад, ячейки технології асинхронної передачі пакетів) як вихідні дані використаємо матрицю тяжіння F_{ij} де $F_{ij} = L \cdot \lambda_{ij}$ – величина потоку, що планується для передачі по лінії зв'язку між вузлами i і j ; λ_{ij} – інтенсивність потоку заявок (пакетів) на вході/виході лінії зв'язку між вузлами i і j .

Потрібно визначити оптимальні значення пропускних здатностей ліній зв'язку мережі $V_{ij}^{\text{опт}}$. Вони будуть вважатися оптимальними за умови рівності вихідних матриць суміжності навантаження, що планується F_{ij} між вузлами матриці тяжіння (S і T) і розрахованими матрицями суміжності оптимальних потоків $F_{ij}^{\text{опт}}$ між цими вузлами ($\|F_{ij}\| = \|F_{ij}^{\text{опт}}\|$).

Необхідно реалізувати функціональну залежність $V_{ij} = f(F_{ij}^{\text{опт}})$. Ця задача і є задачею синтезу. Для її вирішення в якості функціоналу оптимізації використовуємо середній мінімальний час затримки пакету [5]:

$$\bar{T}_{\text{затр}} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j} \frac{F_{ij}}{V_{ij} - F_{ij}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де F_{ij} – величина потоку в лінії зв'язку ланки мережі між вузлами i і j ; V_{ij} – величина пропускної здатності лінії зв'язку мережі між вузлами i і j ; γ – трафік мережі при передачі початкового потоку F_j^0 (згідно матриці тяжіння) від вузла S до вузла T .

Як рівняння зв'язку при умовній оптимізації (1) використовуємо об'єктивний закон для кожного вузла комутації мережі – закон збереження потоків:

$$\sum_{j=1}^{p-1} F_{ij} = aF_j^0, \quad i \neq j, \quad (2)$$

де $F_{ij} = -F_{ji}$ – потік в ланці; F_j^0 – початковий потік, що належить вузлу j ; a – зв'язаність вузла j , дорівнює кількості суміжних йому ланок:

$$a = \begin{cases} 1 & \text{при } j = S; \\ 0 & \text{при } j \neq S; \\ -1 & \text{при } j = T, \end{cases}$$

де S – вузол-джерело; T – вузол-одержувач.

Вирішимо поставлену задачу з використанням методу непрямой оптимізації [6]. Для її вирішення застосуємо метод множників Лагранжа [7], згідно якого функціонал оптимізації, відповідно до виразів (1) і (2), прийме вигляд:

$$\Phi = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^v \frac{F_{ij}}{V_{ij} - F_{ij}} + \sum_{j=1}^v P_j \sum_{i=1}^{v-1} F_{ij} + aF_j^0, \quad (3)$$

де P_j – множники Лагранжа.

Враховуючи те, що закон збереження потоку справедливий для всіх вузлів мережі, то завжди для одного з вузлів сума потоків є лінійною комбінацією потоків всіх інших вузлів. Тому у виразі (3) має місце $j = \overline{1, (v-1)}$. Для отримання симетричного рішення ця обставина може не враховуватися, допускаючи, що $j = \overline{1, v}$. Але, необхідно врахувати це припущення після рішення задачі оптимізації шляхом допущення, що $P_v = 0$. Для визначення оптимальних значень потоків $F_{ij}^{\text{опт}}$, що забезпечує мінімум функціонала (1).

обчислимо часткові похідні $\frac{\partial \Phi}{\partial F_{ij}} = 0$. (4)

Диференціювання по всій множині значень $i, j = \overline{1, v}$, припускає, що початкова топологічна структура мережі є повнозв'язною. Обчислення похідних (4) приводить до системи рівнянь вигляду:

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij})^2} = \gamma(P_j - P_i), \quad i, j = \overline{1, v}; \quad \text{причому } i \neq j, \quad P_v = 0. \quad (5)$$

Число цих рівнянь визначається кількістю гілок графа і для повнозв'язної мережі дорівнює $k = v(v-1)/2$, звідси значення потоків для кожної гілки визначаються виразом

$$F_{ij}^{\text{опт}} = V_{ij} - \sqrt{\frac{V_{ij}}{\gamma(P_j - P_i)}}. \quad (6)$$

Множники Лагранжа P_j та P_i знайдемо шляхом підстановки (6) в (2):

$$\sum_{i=1}^v (V_{ij} - \sqrt{\frac{V_{ij}}{\gamma(P_j - P_i)}}) = aF_j, \quad j = \overline{1, v-1} \quad (7)$$

і спільного рішення системи (7). Але, у зв'язку з тим, що рівняння системи (7) ірраціональне, спроба його рішення приводить до системи нелінійних рівнянь високого порядку, рівного подвоєному значенням кількості вузлів мережі. Неможливо аналітично вирішити таку систему відомими математичними методами. Для визначення множників Лагранжа проведемо їх лінеаризацію шляхом розкладання лівої частини виразу (5) в ряд Тейлора

навколо точки F_{ij}^0 [8]. У результаті розкладання $\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij})^2}$ (8)

отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно F_{ij}^0

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} + \frac{2V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^3} (F_{ij}^{\text{опт}} - F_{ij}^0) = \gamma((P_j - P_i)), \quad (9)$$

де $F_{ij}^0 = aV_{ij}$; a – коефіцієнт, що визначає точку розкладання F_{ij}^0 на осі V_{ij} (він може змінюватися у межах $0 \leq a \leq 1$).

Функція (9) після перетворень приводиться до вигляду:

$$F_{ij}^{\text{опт}} = b_{ij} - (P_i - P_j)a_{ij}, \quad (10)$$

де $a_{ij} = \gamma \frac{(V_{ij} - F_{ij}^0)^3}{2V_{ij}}$, (11)

$$b_{ij} = \frac{3F_{ij}^0 - V_{ij}}{2}. \quad (12)$$

Після підстановки (10)...(12) в (2) отримаємо систему рівнянь, яку подамо у матричній формі:

$$A \cdot X = C, \tag{13}$$

де A , X та C – матриці коефіцієнтів a_{ij} , множників Лагранжа P_{ij} і вільних членів b_{ij} відповідно. Якщо матриця невинроджена, то рівняння (13) має рішення:

$$X = A^{-1} \cdot C, \text{ де } A^{-1} \text{ – зворотна матриця матриці } A. \tag{14}$$

Таким чином, множники Лагранжа P_{ij} можна визначити за методом Крамера або шляхом перемноження зворотного матриці A^{-1} на матрицю C , а оптимальні значення потоків - за виразом (10). Величину трафіку мережі γ визначимо кількістю пакетів, що надходять у мережу за одиницю часу (або кількістю пакетів, що залишають мережу за одиницю часу). Тобто, трафік мережі γ вважається сталою величиною і не впливає на величину F_{ij}^{opt} . Тому, в розрахунках F_{ij}^{opt} за виразом (10) величина трафіку δ може бути прийнята за одиницю, або визначатися за виразом

$$\gamma = a_{пр}^* \cdot \sum_{ij=1}^k V_{ij}, \tag{15}$$

де $a_{пр}^*$ – прийнятний коефіцієнт a , що визначає вибір точки розкладання F_{ij}^0 при оптимальному розподілі початкового потоку F_j^0 між парою вузлів та матриці тяжіння; $\sum_{ij=1}^k V_{ij}$ – загальна пропускна здатність усіх k -ліній зв'язку при оптимальному розподілі початкового потоку між парою вузлів S і T .

Трафік, який визначається виразом (15), відрізняється від оптимального трафіку, отриманого у наслідок розподілу початкового потоку F_j^0 між парою вузлів S і T . Він дає приблизну уяву про величину оптимального трафіку у мережі. Для розрахунку $\bar{T}_{зад}^{min}$ за виразом (1) необхідно розрахувати дійсне значення трафіку: $\gamma = \sum_{ij=1}^k F_{ij}^{opt}$, тобто, після визначення матриці оптимальних потоків між вузлами S і T .

Рішення задачі оптимального розподілу потоків навіть у лінійному наближенні з використанням виразів (10)...(14) виявляється досить складним. Це пояснюється істотною залежністю області допустимих значень оптимальних потоків у кожній гілці графа мережі $0 \leq F_{ij}^{opt} \leq V_{ij}$ від положення початкової точки F_{ij}^0 в якій здійснюється розкладання (7) у ряд Тейлора. Оцінка точності розкладання функції, що досліджується, проведена з використанням коефіцієнта a , який визначається відношенням F_{ij}^0/V_{ij} . Таке припущення спрощує інтерпретацію результатів, так як відповідає за змістом величині відносного навантаження на лінії зв'язку мережі (ступеня завантаження каналу). Вибір прийнятних значень єдиного для мережі коефіцієнта $a_{пр}^*$ має здійснюватися в інтервалі $a_{пр}$, величина якого визначається двома умовами. Перша умова – умова збіжності ряду Тейлора [9]:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n + R_n(x), \tag{16}$$

залишковий член, якого дорівнює

$$R_n(x) = f(x) - T_n(x) = 0, \text{ при } n \rightarrow \infty \tag{17}$$

де $T_n(x)$ – права частина виразу (16); n – ступінь похідної.

Для функціоналу, що розкладається в ряд (8), вирази (16) і (17) приймають вигляд:

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij})^2} = \frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} + \dots + \frac{\left[\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} \right]^{(n)}}{n!} (F_{ij} - F_{ij}^0)^n + R_n(x),$$

$$\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij})^2} - \frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} - \dots - \frac{\left[\frac{V_{ij}}{(V_{ij} - F_{ij}^0)^2} \right]^{(n)}}{n!} (F_{ij} - F_{ij}^0)^n = 0.$$

Умова збіжності ряду (17) буде виконуватися, якщо $(V_{ij} - F_{ij}^0) \geq 1$, тобто $V_{ij} - aV_{ij} \leq 1$, або $a_{пр} \leq 1 - \frac{1}{V_{ij}}$ для окремої гілки зв'язку. Для мережі у цілому, маємо

$$a_{пр}^* \leq 1 - \frac{1}{V_{ij}^{min}}.$$

Друга умова визначається допустимою областю можливих змін оптимальних потоків при заданій матриці пропускних спроможностей ліній зв'язку. При цьому враховується максимально допустиме навантаження на різні види ліній зв'язку, що використовуються (проводові, оптоволоконні лінії зв'язку, радіо) тобто: $0 \leq F_{ij}^{\text{опт}} \leq V_{ij}$. (18)

Для визначення інтервалу прийнятних значень $a(a_{\text{пр}}^*)$ за другою умовою, з виразу (13) запишемо значення множників Лагранжа за правилом Крамера і для визначення оптимальних потоків підставимо їх у вираз (10). Із отриманих значень запишемо залежність $a_{ij} = f(F_{ij}^{\text{опт}})$.

Розглянемо особливості вибору точки розкладання F_{ij}^0 виразу (8) в ряд Тейлора, коли пропускні здатності ланок мережі значно відрізняються один від одного, скориставшись графіками, характерними для двох вузлів мережі. Графік виразу (8) для кожної з ланок мережі має вигляд (рис. 2).

У цьому випадку, при виборі єдиної точки розкладання F_{ij}^0 для мережі, шляхом вибору $a_{\text{пр}}^*$, оптимальний розподіл потоків може привести до невиконання умови (18) в окремих її ланках, через вибір точки розкладання на різних ділянках кривих 1...3. в тому числі недостатньо лінійних (крива 2). Такі ситуації можливі, якщо пропускні здатності ланок мережі значно відрізняються одна від одної за величиною (не менше ніж на порядок), що не характерно для транспортних магістралей мереж. Якщо умова (18) не виконується після оптимального розподілу потоків для окремих ланок мережі, то необхідно:

- підбором $a_{\text{пр}}^*$ спробувати знайти спільну область допустимих значень потоків у мережі;
- перерозподілити ресурс, що планується V_{ij} і повторити розрахунки за оптимальним розподілом потоків.

Висновки. 1. Для моделі мережі М/М/1 з використанням метода непрямої оптимізації отримані аналітичні вирази, що дозволяють визначити оптимальні значення потоків у лініях зв'язку при заданій матриці тяжінь між вузлами мережі. В якості рівняння зв'язку використаний об'єктивно існуючий закон збереження потоків у вузлах комутації мережі.

2. Отримані значення оптимізуються показників мережі задовольняють вимогам точності при проведенні інженерних розрахунків.

3. Математичний апарат розрахунку параметрів, що запропоновано F_{ij} , V_{ij} , $\bar{T}_{\text{зад}}^{\text{min}}$ можна використовувати при розрахунках мереж будь-якої топологічної структури і довільної зв'язності.

Таким чином, вирішена задача визначення основних оптимізаційних показників телекомунікаційної мережі і отримані аналітичні вирази дозволяють здійснити їх обґрунтований вибір.

Література

- Самойленко В. И. Техническая кибернетика / Самойленко В. И., Пузырев В. А., Грубрин И. В. : учеб. пособие. – М.: изд-во МАИ, 1994. – 280 с.
- Будущие сети: целевые установки и цели проектирования // Рекомендация МСЭ-Т Y.3001. – 2011
- Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012–2017.

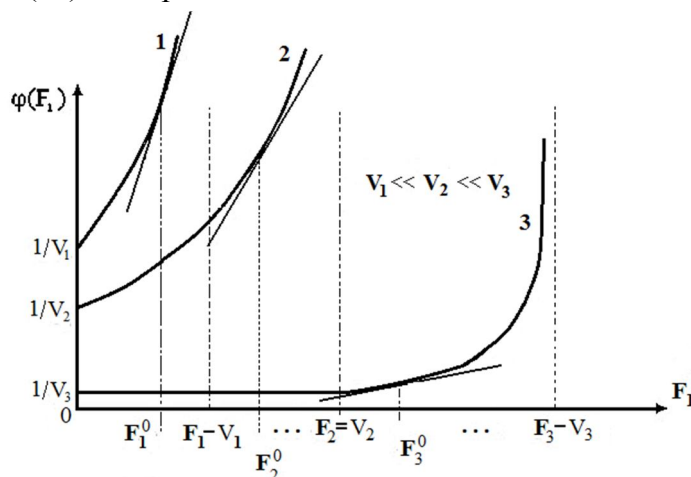


Рис. 2. Вибір точки розкладання

4. Иванов П. Поколение «5» / П. Иванов // Сети/network world. – 2012. – № 06. – С. 27.
5. Аналитическое решение задачи оптимального распределения потоков в сети передачи данных / Л.А. Фомин, С.А. Турю, А.И. Ватаги и др. // Сб. науч. тр.: Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ. – 2002. – № 2(18). – С. 3-12.
6. Линец Г.И. Оптимизация пропускных способностей линий связи корпоративных сетей с использованием метода косвенной оптимизации / Г.И. Линец // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т 311, № 5. – 102 с.
7. Kleinrock L. Queuing systems. Vol 2: Computer applications -N.Y.: Wiley, 1976. – P. 27.
8. Бертсекас Д. Сети передачи данных /Д. Бертсекас, Р. Галлагер // М.: Мир, 1989. – 544 с.
9. Определение ресурса памяти узлов коммутации сети передачи данных / Л.А. Фомин, П.А. Будко, Н.Н. Гахова и др. // Сб. науч. тр.: Системы обработки информации. – 2000. – №2(8). – С. 102-104.

УДК 621.373-187.4; 621.39.072.9

Федорова Н.В., к.т.н. (*Государст. унив-т информационно-коммуникационных технологий*)

СИНХРОННЫЙ ETHERNET, КАК СРЕДА ПЕРЕДАЧИ СИНХРОНИЗАЦИИ В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

Федорова Н.В. Синхронный Ethernet, як середовище передачі синхронізації в мережах з комутацією пакетів. Розглянуто придатність застосування механізму Sync-E в якості середовища передавання синхронізації для мереж з комутацією пакетів.

Ключові слова: СИНХРОНІЗАЦІЯ, СИНХРОНІЙ ETHERNET, МЕРЕЖА З КОМУТАЦІЮ ПАКЕТІВ

Федорова Н.В. Синхронный Ethernet, как среда передачи синхронизации в сетях с коммутацией пакетов. Рассмотрена пригодность применения механизма Sync-E в качестве среды передачи синхронизации для сетей с коммутацией пакетов.

Ключевые слова: СИНХРОНИЗАЦИЯ, СИНХРОННЫЙ ETHERNET, СЕТЬ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

Fedorova N.V. Synchronous Ethernet, as an environment transmission of synchronization in networks with commutation of packages. The fitness of application of mechanism of SyncE is considered as an environment of transmission of synchronization for packet networks.

Key words: SYNCHRONIZATION, SYNCHRONIZATION ETHERNET, PACKET NETWORKS

Введение. Будущее сетей электросвязи – это переход от существующей транспортной среды SDH к технологиям с коммутацией пакетов (IP/IPMPLS/Ethernet).

Переход от сетей с временным уплотнением к сетям с коммутацией пакетов – это существенное изменение и оно требует тщательного исследования. Сети с временным уплотнением (т.е. оптические сети синхронной цифровой иерархии (SONET/SDH), плездохронной цифровой иерархии (PDH)) – это технологии, в которой синхронизацию обеспечивают естественным образом на физическом уровне [1].

Трансляцию сигналов синхронизации традиционно выполняли в эпоху сетей с временным уплотнением на физическом уровне линейных сигналов на основе хорошо известных понятий, технических правил и опыта. Такой подход применим и к технике коммутации пакетов, если использовать синхронный Ethernet.

Синхронный Ethernet (SyncE) – это важный этап развития технологии Ethernet как доведение ее до уровня, пригодного для операторов глобальных сетей, в которых необходима синхронизация тактовой частоты.

Технологию коммутации пакетов изначально разрабатывали для асинхронной работы, когда генераторное оборудование работает в режиме свободных колебаний. Хотя основа