

## КЕРУВАННЯ ТРАФІКОМ В МУЛЬТИСЕРВІСНОМУ КОМУТАЦІЙНОМУ ЦЕНТРІ

Л. С. Глоба, М. А. Скулиш

Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна

Досліджено засоби керування інформаційними потоками в мультисервісних мережах зв'язку. Вдосконалено роботу комутаційного центру на основі розробленого методу розподілу інформаційних потоків між вихідними каналами. Показано, що за рахунок цього підвищується ефективність передачі комбінованих інформаційних потоків у комутаційному центрі на границі мережі мобільного оператора та орендованої мережі з комутацією пакетів. Одночасно забезпечується підтримка необхідної якості передачі трафіків інтерактивного відео та Інтернет. Вдосконалено спосіб зваженого кругового обслуговування черг абонентських заявок, що дозволяє ефективно аналізувати непередбачувані піки навантаження, характерні для самоподібного трафіку. Використання отриманих результатів дозволяє комплексно вирішити задачу обробки мультисервісного трафіку, враховуючи його тип та навантаженість вихідних каналів, а також зменшити втрати пакетів.

The means of information streams controlling in multiservice communication networks are investigated. The commutation center operating based on the developed method of information streams distribution between output channels is improved. This increases the transmitting efficiency of combined information streams in the commutation center on the boundary of both mobile operator network and leased network with packet commutation. Therefore the support of the required transmitting quality is ensured for video and Internet traffics. The weighting round service method of subscriber requests queues is improved. This allows effective analyzing of the unforeseen loading peaks which are typical for the self-similar traffic. Using the results obtained allows to solve the problem of multiservice traffic processing comprehensively taking into account the type of traffic and loading of output channels as well as it allows to decrease packets loss.

### Вступ

Однією з ключових задач у сфері надання телекомунікаційних послуг є підвищення якості обслуговування абонентів у мережах мобільного зв'язку [1]. Якщо абонента не влаштовують послуги, що надаються, він без особливих зусиль може змінити оператора зв'язку. Проблема ускладнюється тим, що спектр необхідних послуг розширюється з кожним днем. Якщо раніше мобільний зв'язок використовувався тільки для передачі телефонного трафіку, то сьогодні абоненти все більше замовляють послуги інтерактивного відео, доступу до всевітньої мережі Інтернет, тощо, а це передбачає передачу великих об'ємів інформації різного типу з різними вимогами до якості передачі. Зростання об'ємів трафіків зумовлює необхідність вирішення проблеми ефективної передачі інформації при одночасному забезпеченні заявленого рівня якості обслуговування.

Однією з перспективних технологій стосовно розв'язання цієї проблеми вважається протокол PWE3. Цей протокол через мережу з комутацією пакетів здійснює емуляцію постійних з'єднань між комутаційними центрами, до яких підключені базові станції, та контролером базових станцій. Органі-

зація імітації постійних з'єднань дозволяє забезпечити якість передачі інформаційних потоків на рівні технологій ATM, Fast Ethernet, Frame Relay, тощо, використовуючи канали всевітньої павутини, де інформація передається за технологією комутації пакетів.

Проведені дослідження [2] показали, що характер вхідних потоків не може бути описаний за допомогою класичних моделей найпростішого потоку. Відео трафік та Інтернет трафік являють собою самоподібні потоки, на відміну від телефонного трафіку з пуасонівським розподіленням потоків. Ці особливості трафіків необхідно враховувати при моделюванні телекомунікаційної системи та керуванні інформаційними потоками. Більшість задач в теорії самоподібного телетрафіку ще не мають свого розв'язку, оскільки вона зараз проходить ранню стадію свого розвитку.

Найбільш важливі задачі, що потребують невідкладного вирішення, пов'язані з моделюванням процесів керування самоподібними інформаційними потоками в мережах мобільних операторів при передачі інформації за допомогою протоколу PWE3, оптимізацією маршрутизації у комутаційному центрі, який є пограничним між базовими станціями

і мережею з комутацією пакетів, обробкою черг. При розробці перспективних моделей та методів керування інформаційними потоками необхідно враховувати різномірну природу трафіків з максимальною адаптацією до протоколу передачі.

### **Забезпечення якості обслуговування в мережах PWE3**

Протокол PWE3 є основою мереж нового покоління NGN, які організуються на вже існуючих мережах з комутацією пакетів. Для забезпечення необхідних сервісів є обов'язковим контроль за якістю обслуговування абонентів. В PWE3 передбачається підтримка таких механізмів забезпечення якості обслуговування сервісів. Тому при моделюванні мереж на основі протоколу PWE3 доцільно спиратися на існуючі методи забезпечення якості обслуговування. З огляду на обмеженість мережесвих ресурсів (буферного простору на вузлах мережі, пропускної здатності трактів передачі, обчислювальних потужностей та часу на прийняття рішень) мультисервісна мережа PWE3 повинна мати ефективні засоби забезпечення QoS (Quality of Service). Якість послуг визначається як деяка інтегрована оцінка ступені задоволення користувача послугою, що надається. В PWE3, як у мережах наступного покоління NGN, розв'язок задач забезпечення QoS здійснюється у підсистемах адміністративного керування, керування технічною експлуатацією та динамічного керування. Коректність розв'язку задач QoS є невід'ємною умовою підвищення ефективності телекомунікаційних мереж (ТКМ), що побудовані на принципах NGN [3, 4]. За рівнем гарантії якості обслуговування розрізняють сервіс з мінімальними зусиллями (Best effort Service), сервіс із перевагою (Differentiated Service), та гарантований сервіс (Guaranteed Service) [2, 5].

Розв'язок загальної проблеми забезпечення якості обслуговування передбачає узгоджене рішення цілого комплексу задач. Серед них найважливішими є: зміна зв'язності структури ТКМ за рахунок введення в систему або видалення з неї окремих мережесвих вузлів або трактів передачі; нарощування працездатності вузлів та пропускної здатності трактів передачі ТКМ; реконфігурація мережесвого обладнання; зміна стратегій маршрутизації інформаційних потоків; налаштування механізмів пріоритетної обробки пакетів на всіх або на частині мережесвих вузлів; реорганізація доступу до необхідних мережесвих ресурсів.

Типове рішення задач забезпечення QoS охоплює: класифікацію прикладних програм з назвою пріоритетів та диференціацією трафіку; профілю-

вання інформаційного трафіку; обмеження трафіків, що надходять у мережу від користувача; керування чергами із встановленням черговості обробки пакетів на вузлах мережі; маршрутизацію мережесвого трафіку.

Розв'язання задач QoS в рамках відмічених областей узгоджено визначає набір керівних механізмів та протоколів передачі [1, 3, 6]. Наприклад, вибір типу трафіку обумовлює особливості вирішення решти задач, таких як маршрутизація, знаходження розподілу каналесних ресурсів тощо.

Кожний тип ліній зв'язку характеризується ймовірністю втрати пакетів для мережі доступу (Access Network) та опорної мережі, відповідно PAN і PCN. Для кожного комутатора може бути змінена величина  $T_j$ , що визначає час затримки IP пакетів. При комутації пакетів величину  $T_j$  варто розглядати як випадкову, що складається з тривалості очікування пакету в черзі та часу його обробки.

Більшість характеристик якості обслуговування трафіку в мережах з комутацією каналів можна покращити за рахунок використання передових методів кодування та обробки сигналів. Це твердження відноситься і до показників якості передачі пакетів (втрати та викривлення інформації). Неможливість компенсувати час затримки IP пакетів може суттєво знизити якість телефонного зв'язку та інтерактивного відео.

Досвід впровадження обладнання IP телефонії показав, що суттєва затримка обміну інформацією може бути обумовлена використанням неоптимальних способів кодування сигналу та формування пакетів для наступної їх передачі в IP мережу, а також надмірним накопиченням пакетів з метою мінімізації дисперсії часу їх передачі через IP мережу.

Співставлення цих затримок з нормами на припустимий час передачі пакетів через IP-мережу дозволяє зробити висновок про неможливість реалізації стратегій "Метод виміщування" та "Острови NGN" [7] при збереженні прийнятної якості телефонного зв'язку. Більше того, навіть вибір стратегії "Накладна мережа" ще не гарантує забезпечення всіх заданих показників якості обслуговування трафіку. Саме тому всі телефонні мережі будуються з використанням пакетних технологій, де протокол PWE3 відповідає вимогам ефективної передачі інтерактивних трафіків.

Проведений аналіз показав, що ефективно застосування протоколу PWE3 при передачі інформаційних потоків через мережу з комутацією пакетів PSN (Packet Switched Network) може бути досягнуто при оптимальній організації пограничного комутаційного центру PE (Provider Edge). В PE формуються па-

кети інформації для передачі по каналах PW (Pseudo-wire). Від ефективності формування інформаційних потоків залежить якість передачі інформації через PSN.

PWE3 забезпечує належне обслуговування абонентів у технологіях ATM, Frame Relay, Fast Ethernet при передачі інформаційних потоків через мережу з комутацією пакетів. В рамках статті розглядається технологія асинхронної передачі ATM (Asynchronous Transfer Mode), яка має характеристики, необхідні для забезпечення належного рівня якості обслуговування мультисервісних інформаційних потоків. Технологія ATM забезпечує підтримку SONET/SDH інкапсуляції та SONET/SDH конфігурацію заголовків, а також сигналізацію фізичного рівня. ATM інтерфейс підтримує постійний віртуальний маршрут та постійний віртуальний канал PVP/PVC. Передача пакетів через PSN дозволяє використовувати більш ранні ATM мережі без додавання нового обладнання та зміни їх конфігурації. Абонентські маршрутизатори забезпечують передачу ATM пакетів через канали з часовим розділенням TDM (Time Division Management).

### Постановка задачі

В статті ставиться задача знаходження оптимального розподілу заявок на організацію віртуальних каналів та віртуальних маршрутів між вихідними каналами PW. Рівномірний розподіл заявок з урахуванням класу трафіку дозволить скоротити втрати пакетів у чергах вихідних PW, а також втрати при проходженні PSN.

При вирішенні задачі забезпечення QoS важливо організувати належний порядок обслуговування черг заявок у вихідних каналах PW. Існуючі методи обслуговування черг базуються переважно на розділенні каналного ресурсу між чергами [1]. Усуспільнення ресурсу підвищує ефективність мережі, як це можна бачити на простому прикладі обслуговування потоку заявок. Припустимо, що на вхід пристрою з інтенсивністю обслуговування  $\mu$  поступає потік заявок з інтенсивністю  $\lambda$ . Тоді продуктивність роботи такої системи можна визначити як  $Y_1 = 2\rho_1 / (1 + \rho_1)$ , де  $\rho_1 = \lambda / \mu$  — навантаження, що створюється інформаційним потоком. Збільшено кількість обслуговуючих пристроїв вдвічі, а також подвоїмо інтенсивність вхідного потоку. Продуктивність системи стає  $Y_2 = 16\rho_1^2 / (1 + 2\rho_1 + 2\rho_1^2)$ .

З цих співвідношень випливає, що при навантаженні на систему, яке значно перевищує номінальне, продуктивність системи з двома обслуговуючими пристроями у два рази більша, ніж продуктивність у разі використання одного обслуговуючого

пристрою. Чим більше перевантаження, тим ефективнішим стає збільшення кількості обслуговуючих пристроїв. Принцип усуспільнення ресурсів будемо застосовувати для вдосконалення механізмів обслуговування черг заявок. Удосконалення методу керування комбінованим трафіком у комутаційному центрі PE засновується на відповідній зміні схеми його роботи. Враховуючи специфіку передачі інформації від однієї границі мережі PSN до іншої, для забезпечення рівномірного заповнення черг усіх типів трафіків вихідних PW каналів при маршрутизації типу “точка—точка” блок класифікації трафіку повинен бути розташований перед блоком комутації. Проблема різниці швидкодії блоків мережі може бути вирішена за рахунок збільшення кількості блоків класифікації до кількості вихідних каналів. В результаті на один канал припадає один блок класифікації.

Удосконалений метод керування комбінованим трафіком у комутаційному центрі включає: рішення задачі динамічної маршрутизації; покращення перерозподілу навантаження між чергами у вихідних каналах зв'язку та дисципліни їх обслуговування (ефект усуспільнення ресурсу); знаходження оптимальної величини навантаження, що перерозподіляється; створення засобів керування динамічним перерозподілом навантаження та алгоритмів їх реалізації.

Для вирішення поставлених задач у системі керування інформаційними потоками за протоколом PWE3 необхідно вибрати критерій оцінки якості роботи комутаційного центру PE, а також одержати базові математичні моделі, що описують інформаційні потоки за заданим критерієм. Це вимагає системного підходу з метою удосконалення методу керування комбінованим трафіком у комутаційному центрі PE для забезпечення гарантованої якості обслуговування інформаційних трафіків.

### Математичні моделі самоподібного потоку ATM трафіку

Проведені дослідження [2, 8] показують, що мультимедійні та Інтернет трафіки є самоподібними потоками. Класичні моделі не можуть адекватно описати взаємні залежності між вхідними пакетами інформаційних трафіків, що супроводжують передачу відео та Інтернет потоків. Існуючі математичні моделі засновані на припущенні, що вхідний інформаційний потік описується пуасонівським розподілом з інтенсивністю надходження заявок  $\lambda$ . Можна показати, що пуасонівський процес є частинним випадком самоподібного процесу, для якого параметр Херста  $H = 0,5$ . На якісному рівні самоподіб-

ність проявляється в наявності повільно спадаючої залежності між величинами трафіку в різні моменти часу. При цьому трафік гуртується у пачки даних, і ці пачки виглядають статистично подібними в широкому діапазоні зміни масштабу по шкалі часу.

Відповідно до моделі самоподібного трафіку заявки надходять у довільні моменти часу  $t_i$ , а пакети в рамках однієї заявки надходять безперервно протягом часу  $\tau_i$ , де  $i=1,2,3,\dots$  — номер заявки на обслуговування. Побудова базової математичної моделі самоподібного трафіку засновується на припущенні, що тривалість передачі повідомлення розподілена за законом Парето, а моменти надходження заявок на обслуговування  $t_i$  підпорядковуються експоненціальному закону. Точна оцінка ймовірності переповнення черг (ймовірність втрати пакетів) для самоподібного трафіку є складною задачею, яка не має однозначної відповіді. Найбільш прийнятною є модель, яка дозволяє оцінити верхню межу ймовірності переповнення черги [5]. Така ймовірність може бути розрахована за формулою:

$$P_{over} \leq \frac{c_0 \lambda R^\alpha}{\alpha(\alpha-1)(C-\lambda R\tau)} h^{-\alpha+1}, \quad (1)$$

де  $P_{over}$  — верхня границя ймовірності переповнення черги у вихідному каналі;  $c_0$  — мінімальна довжина повідомлення;  $\lambda$  — інтенсивність вхідного потоку, що направляється у вихідний канал;  $R$  — швидкість передачі джерела інформації;  $\alpha$  — параметр самоподібного потоку;  $h$  — довжина черги у вихідному каналі;  $C$  — швидкість передачі інформації в каналі зв'язку. Параметр самоподібного потоку  $\alpha$  є рішенням рівняння

$$\tau = c_0 \sum_{l=1}^{\infty} l^{-\alpha},$$

де  $\tau$  — середня довжина повідомлення.

Слід зауважити, що оцінка верхньої межі ймовірності по співвідношенню (1) є наближеною і не підходить для точного розрахунку необхідного каналного ресурсу при передачі інформаційних потоків. Однак з точки зору оцінки ефективності розподілу ресурсів каналів PW, які імітуються, та для оптимізації розподілу пакетів в чергах вихідних каналів запропонована оцінка є цілком задовільною.

### Динамічний розподіл заявок та обслуговування інформаційних потоків

Аналіз роботи мереж за протоколом PWE3 показав неефективність існуючого розподілу інформаційних потоків від базових станцій по тунелях, відведених для передачі інформації. Передача здійс-

нюється таким чином, що для кожної базової станції прокладається окремий тунель, тобто імітується постійне з'єднання, по якому організується передача всіх інформаційних потоків від однієї базової станції, як показано на рис. 1. Конфігурація мережі за протоколом PWE3, яка схематично показана на рис. 1 стає неефективною, якщо навантаження на базові станції змінюється в залежності від часу.

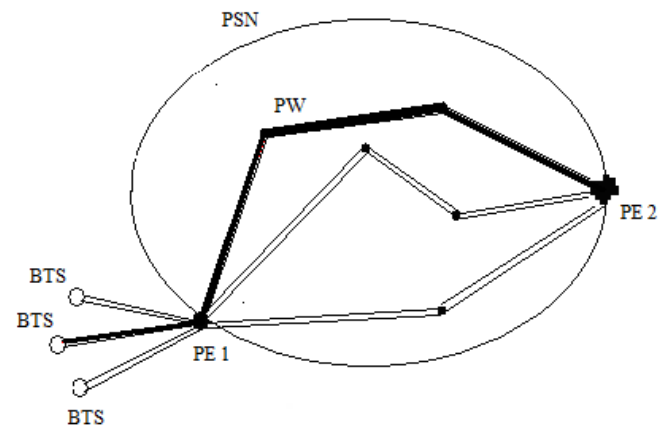


Рис. 1. Організація PWE3

Відповідні дослідження показали доцільність розв'язання задачі ефективного розподілу каналного ресурсу мережі, тобто передачі сумарного інформаційного потоку від усіх базових станцій по всіх тунелях між двома комутаційними центрами PE1 та PE2. Обробка заявок у PE1 та PE2 мережі PWE3 виконується так само, як і у будь-якому комутаційному центрі.

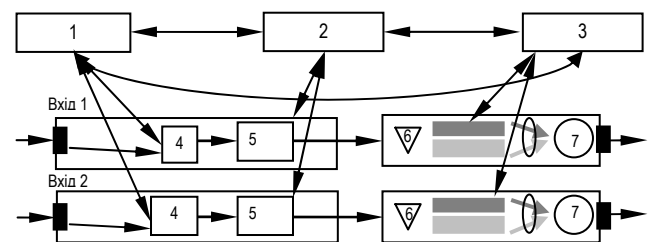


Рис. 2. Схема обробки заявок у комутаційному центрі: (1) блок центрального керування; (2) блок центральної комутації; (3) блок моніторингу; (4) аналізатор; (5) комутатор; (6) класифікатор; (7) обслуговуючий пристрій

На рис. 2 показана схема роботи комутаційного центру, де видно, що всі потоки, які поступають на вхід, спершу комутуються, тобто розподіляються по каналах зв'язку, а потім класифікуються та утворюють черги відповідно до типу трафіку. Таким чином, якщо на вході спостерігається сплеск навантаження заявок заданого типу, тоді втрати пакетів з перевантаженої черги зростають. Видалення повід-

омлень відноситься до недоліків комутаційного центру, а механізми керування трафіком глобально не вирішують задачу боротьби з перевантаженням.

Фактично маршрутизація інформаційних трафіків від PE1 до PE2 в комутаційному центрі мережі PWE3 здійснюється за принципом “точка—точка”. В конфігурації “точка—точка” система має змогу повністю контролювати характеристики трафіку і у разі потреби допускає зміну схеми роботи комутаційного центру PE, як це показано на рис. 3.

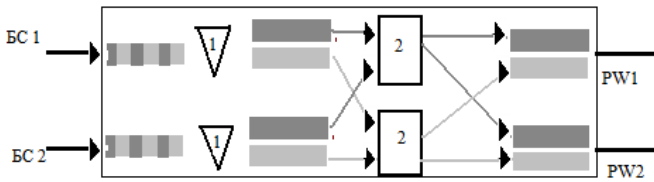


Рис. 3. Вдосконалена схема роботи комутаційного центру: (1) класифікатор; (2) маршрутизатор

Класифікація трафіку до процесу комутації дозволяє контролювати наповнення черг заданих класів трафіків у вихідних каналах. Тоді у разі переповнення черг буде доцільним розв’язання задачі динамічної маршрутизації відповідно до схематичного зображення, показаного на рис. 4.

Інформаційні потоки, які надійшли до комутаційного центру, розподіляються між вихідними каналами таким чином, що в кожний  $j$ -й канал направляється  $x_{ij}$  доля інформації, де  $i$  — тип трафіку, а  $\lambda_{ij} = x_{ij}\lambda_i$ . Припустимо, що для розв’язання задачі мають місце наступні вхідні дані:  $P_{over\ ij}$  — верхня межа ймовірності втрати пакетів, що є функцією інтенсивності вхідного навантаження;  $P_i$  — ймовірність максимально допустимих втрат пакета  $i$ -го типу трафіку;  $a_i$  — нормований коефіцієнт  $i$ -го типу трафіку, який задається оператором;  $s_i$  — об’єм блока інформації  $i$ -го типу, що розподіляється між вихідними каналами. Нехай  $s_{ij}$  — кількість пакетів  $i$ -го типу в блоці  $s_i$ , що направляються в  $j$ -й канал;  $x_{ij} = s_{ij} / s_i$  — нормовані величини інформаційного потоку  $i$ -го типу, який направляється в  $j$ -й вихідний канал.

Необхідно знайти такий розподіл коефіцієнтів  $x_{ij}$ , що мінімізує цільову адитивну функцію від показника втрат пакетів (ймовірності переповнення черги) заданого класу трафіку у вихідних каналах комутаційного центру PE1 при таких обмеженнях:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1; x_{ij} \geq 0; \sum_{i=1}^2 a_i = 1; a_i \geq 0,$$

де  $N$  — кількість вихідних каналів.

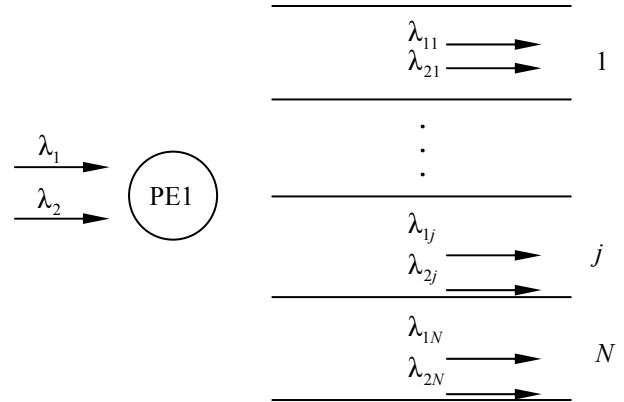


Рис. 4. Схема вузлової динамічної маршрутизації

При сигналізації системи моніторингу про виконання умови  $P_{over\ ij} > P_i$  у припущенні квазістаціонарності інформаційних потоків вирішується оптимізаційна задача пошуку  $x_{ij}$ , що мінімізують цільову функцію  $W_{over}$ :

$$W_{over}(\lambda) = \min_{P_{ij}} \sum_{i=1}^s a_i \sum_{j=1}^n x_{ij} P_{over\ ij}; \quad (2)$$

$$P_{over\ ij} = c_{0i} x_{ij} \lambda_i R_i^{\alpha_i} h^{-\alpha_i+1} / \alpha_i (\alpha_i - 1) (C - x_{ij} \lambda_i R_i \tau_i),$$

де  $P_{over\ ij}$  — верхня границя ймовірності переповнення черги  $i$ -го типу трафіку у  $j$ -му вихідному каналі відповідно до формули (1).

Розв’язок даної оптимізаційної задачі вирішує проблему вибору каналу PW, в якому буде організовано віртуальне з’єднання на час передачі інформаційної заявки. Якщо в результаті розв’язку задачі динамічної маршрутизації виявляється, що в одному з каналів спостерігається перевантаження для даного типу трафіку, то це свідчить про необхідність оптимізації перерозподілу навантаження.

Після сигналізації про перевантаження здійснюється перерозподіл інформаційних потоків між вихідними каналами зв’язку відповідно до результатів розв’язку задачі динамічної маршрутизації. Це приводить до зменшення втрат пакетів трафіку, для якого було виявлено перевантаження, при незначному збільшенні втрат пакетів решти трафіків.

Результати досліджень самоподібних трафіків свідчать про необхідність розробки механізму комплексного керування інформаційними потоками для прогнозування можливості сплесків вхідного навантаження і забезпечення адекватної реакції системи.

### Забезпечення якісного обслуговування абонентів

Забезпечення якості обслуговування абонентів у мережах мобільних операторів зв’язку передбачає

надання гарантованих та диференційованих послуг у масштабах мережі одного оператора. Диференціація послуг потребує декількох рівнів забезпечення якості обслуговування, кожному з яких відповідає власна архітектурна модель забезпечення функцій QoS.

Існує ряд стратегій організації контролю за рівнем QoS. Серед них: забезпечення диференційованих послуг (Diffserv) та інтегрованих послуг (Intserv); резервування каналів зв'язку (RSVP) і алгоритми раннього виявлення перевантажень системи (RED, WRED). Ці механізми пов'язані з організацією обробки черг повідомлень.

Розрізняють різні порядки формування повідомлень у черги. Найширшого застосування набув базовий метод обробки FIFO (First In = First Out), який полягає в тому, що першими обслуговуються повідомлення, які надійшли раніше. Додаткові методи включають черги з пріоритетами, черги абонентів, зважене рівномірне обслуговування. Черги з пріоритетами надають можливість здійснювати першочерговість обробки пакетів завдяки використанню мережевого протоколу, вхідного інтерфейсу, розміру пакета, типу джерела повідомлень та відстані до нього.

Обслуговування черг дозволяє розподіляти смугу пропускання вихідного каналу між прикладними програмами. Абсолютно оптимального розподілу, який міг би забезпечити всім класам трафіку передачі без втрат та затримок, не існує. Але мета апарату керування інформаційними потоками оптимізувати роботу системи таким чином, щоб втрати та затримки пакетів були мінімальними. В даній роботі за критерій оптимізації вибрано ймовірність переповнення черг, мінімізація якої дозволить зменшити втрати заявок, що пов'язані з переповненням буферів вихідних каналів комутаційних центрів, з метою забезпечення заданого рівня QoS для кожної групи абонентів.

### Вдосконалення механізму зваженого кругового обслуговування черг

Механізм зваженого кругового обслуговування черг WRR (Weighted Round Robin) засновується на принципі вибору кількості бітів інформації різних типів трафіків, що передаються у тракт каналу зв'язку за один такт передачі. Механізм WRR являє собою розширений планувальник кругового обслуговування, відповідно до якого кожному трафіку призначається своя вага. Алгоритм WRR обробляє потік трафіку пропорційно до його ваги. Найбільш злагоджено WRR планувальник працює з механізмом комутації ATM, що передає інформацію у ви-

гляді комірок. Кожній черзі виділяється частина смуги пропускання інтерфейсу відповідно до ваги потоку трафіку незалежно від розміру пакета. Достатньо розглядати моделювання алгоритму WRR та його модифікацій.

Алгоритм зваженого кругового обслуговування черг передбачає призначення певному класу трафіку своєї ваги. Вага є параметром, на основі якого розраховується кількість пакетів, що буде забрано з черги  $i$ -го типу трафіку і передано у вихідний канал за один такт передачі. При цьому ефективна ширина смуги пропускання черги дорівнює її вазі, помноженій на ширину смуги пропускання інтерфейсу і поділеній на суму ваг всіх активних черг.

Проведемо оцінку верхньої границі ймовірності переповнення черг трафіку  $i$ -го типу в  $j$ -му вихідному каналі при обробці черг за алгоритмом WRR. Нехай задано загальну швидкість обслуговування повідомлень в  $j$ -му каналі  $C_j$ . Припустимо також, що для кожного типу трафіку відома вага  $w_i$ , яка визначає кількість пакетів, що будуть передані за одиницю часу:

$$w_{Dj}v_j / (w_{Dj} + w_{Vj}) = C_{Dj}; w_{Vj}v_j / (w_{Dj} + w_{Vj}) = C_{Vj},$$

де  $w_{Dj}$ ,  $w_{Vj}$  — вагові коефіцієнти трафіку даних та відео трафіку в  $j$ -му каналі.

Враховуючи те, що трафіки інтерактивного відео та Інтернет характеризуються самоподібними моделями, верхню границю переповнення черг можна визначити за формулою (1). Аналіз характеру зміни інтенсивності вхідних потоків повідомлень свідчить про необхідність більш оптимального порядку обробки черг заявок, якщо в моменти різкого зростання кількості заявок пакети трафіку інтерактивного відео перенаправляються в чергу низькопріоритетного трафіку.

Кількість черг, яка підтримується обладнанням комутаційних центрів завжди обмежена, тому при передачі великих об'ємів трафіків та обробці великої кількості заявок слід розглядати обробку інтерактивного відео в одній черзі, оскільки організація для нього окремої черги здебільшого неможлива. Величина черги визначається кількістю ATM пакетів рівної довжини, які поміщаються у буфері вихідного каналу. З погляду на характер самоподібного трафіку, в якому присутні короткочасні сплески інтенсивності, може бути ефективним перенаправлення комірок відео трафіку на початок черги Інтернет. Фактично це може бути представлено, як перерозподіл кількості пакетів, що забираються з черг відео та Інтернет трафіків за одну транзакцію, в момент виникнення переповнення черги відео трафіку. Це означає зменшення кількості пакетів

низькопріоритетного трафіку, що передаються за одну трансакцію, на кількість пакетів, які надійшли з черги високопріоритетного потоку.

На рис. 5 показано основний принцип розподілу каналного ресурсу за вдосконаленим алгоритмом WRR. При наповненні черги відео заданим числом заявок  $h_V$ , всі пакети даних, що надходять, поступають на перші позиції черги Інтернет. Відповідно до алгоритму WRR встановлюється ліміт на кількість пакетів, які можуть бути перенесені між чергами,  $m \leq C_{Dj}$ , де  $C_{Dj}$  — кількість пакетів, що забираються з черги Інтернет за одну трансакцію, або кількість ATM пакетів низькопріоритетного трафіку, що можуть бути передані за одиницю часу. Таким чином, має місце міграція пакетів між чергами. В результаті черга відео буде збільшена на  $k$  позицій ( $h_V + k$ ), а смуга пропускання для відео трафіку буде збільшена до  $C_{Vj} + k$  пакетів за одиницю часу, де  $k = 1, 2, \dots, m$  залежить від кількості пакетів, які надійшли зверху черги  $h_V$ , але не перебільшує  $m$ .

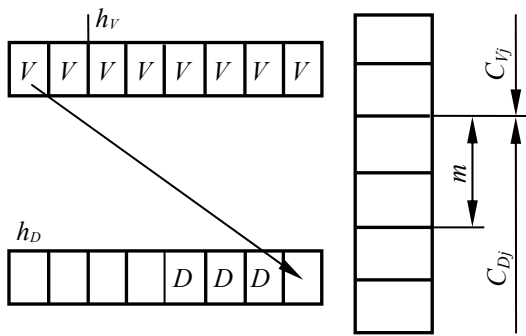


Рис. 5. Схема вдосконаленого алгоритму WRR

Ефективність вдосконалення існуючого алгоритму WRR проілюструємо на наступному прикладі. Нехай  $h_i$  — довжина черги  $i$ -го типу трафіку;  $C_j$  — кількість ATM пакетів, що відправляються за один такт в  $j$ -й PW;  $w_{ij}$  — ваговий коефіцієнт  $i$ -го типу трафіку в  $j$ -му PW;  $z_V$  — кількість заявок в черзі відео трафіку. Потрібно знайти кількість пакетів  $m$ , що можуть бути перерозподілені з черги відео трафіку в чергу трафіку даних.

Відповідно до алгоритму WRR розподіл ATM пакетів, що відправляються у вихідний PW за один такт, знаходиться за формулами:

$$\frac{w_{Dj}V_j}{w_{Dj} + w_{Vj}} = C_{Dj}; \quad \frac{w_{Vj}V_j}{w_{Dj} + w_{Vj}} = C_{Vj}.$$

Модифікація принципу роботи WRR полягає у зміні кількості пакетів одного типу трафіку, що відправляються за один такт у  $j$ -й вихідний канал. Якщо  $z_V > h_V$ , то

$$C_{Vj\ new} = C_{Vj} + m; \quad C_{Dj\ new} = C_{Dj} - m. \quad (3)$$

Критерій пошуку оптимального об'єму навантаження, який перерозподіляється, полягає в тому, щоб знайти таке значення  $m$ , при якому буде виконуватися нерівність:

$$\sum_{j=1}^2 P_{overij\ new} \leq \sum_{j=1}^2 P_{overij},$$

де  $P_{overij\ new} < P_i$  — ймовірність переповнення черги в  $j$ -му вихідному каналі після зміни кількості пакетів високопріоритетного та низькопріоритетного потоків у вихідному тракті за формулами (3);  $P_{overij}$  — ймовірність переповнення черги  $i$ -го типу трафіку в  $j$ -му вихідному каналі;  $P_i$  — максимально допустиме значення ймовірності втрат пакетів для  $i$ -го типу трафіку.

Обчислимо матрицю значень ймовірностей переповнення черг, де кількість пакетів, що забираються з черги відповідного трафіку, змінюється на один ATM пакет.

В результаті при незмінній сумарній кількості пакетів усіх типів трафіків, що відправляються у вихідний PW, кількість пакетів, які забираються з черги високопріоритетного відео трафіку, збільшується з  $C_V$  до  $C_V + C_D - 1$ . При цьому кількість пакетів, що забираються з черги Інтернет трафіку, відповідно зменшується від  $C_D$  ATM пакетів до одного ATM пакета.

Цей процес можна описати наступною формулою

$$M = [P_{overVk}(C_V + k), P_{overDk}(C_D - k)],$$

де  $k = 1, 2, 3, \dots$  — кількість пакетів відео, що перенаправляються в чергу Інтернет;  $P_{overVk}$ ,  $P_{overDk}$  — ймовірності переповнення черг відео та даних за умови перерозподілу  $k$  пакетів відповідно до вдосконаленого алгоритму WRR, які розраховуються за формулою (1);  $C_V$ ,  $C_D$  — ємності каналів, що виділяються для передачі відео та Інтернет трафіків, відповідно.

Необхідно обрати таке максимальне значення  $i$ , для якого виконуються умови

$$\sum_{j=1}^2 P_{ij} < \sum_{j=1}^2 P_{kj}, \quad P_{k1} \leq P_1, \quad P_{k2} \leq P_2,$$

де  $P_1$  та  $P_2$  — порогові значення ймовірностей переповнення черг високопріоритетного та низькопріоритетного трафіків.

В результаті одержуємо  $m = i$  ATM пакетів.

### Принцип комплексного керування інформаційними потоками в комутаційному центрі

Розглянемо запропонований принцип комплексного керування, який засновується на результатах розв'язку оптимізаційної задачі динамічного розподілу заявок. Для здійснення даного керування інформаційними потоками в комутаційному центрі РЕ необхідно мати інформацію про: кількість базових станцій  $N$ , що обслуговуються комутаційним центром відповідно до протоколу PWE3 (при цьому кількість вихідних тунелів PW також дорівнює  $N$ ); інтенсивність надходження заявок  $i$ -го типу трафіку від  $j$ -ї базової станції (кількість заявок за одиницю часу); середню тривалість обслуговування одного повідомлення  $i$ -го типу трафіку; швидкість передачі повідомлень джерелом інформації; швидкість передачі інформації в  $j$ -му каналі PW; довжину черги  $i$ -го типу трафіку в  $j$ -му каналі PW; порогові значення ймовірностей втрат повідомлень для всіх типів трафіків, що обслуговуються.

Для розв'язання цієї задачі необхідно вибрати інтервал дискретизації часу, тобто визначити відрізок часу, через який буде передаватися інформація, а також обчислити значення всіх параметрів системи у одиницях виміру часу. Змінними у системі, що розглядається, є множина долей  $x_{ij}$  інформаційного потоку  $i$ -го типу, який направляється в  $j$ -й вихідний канал.

Запропонований механізм керування передбачає розрахунок долей інформаційного потоку, що направляється у вихідні канали щоразу, коли ймовірність втрат повідомлень принаймні у одному з каналів перевищує задане допустиме значення.

При роботі комутаційного центру РЕ ведеться моніторинг за якістю обслуговування інформаційних потоків. Механізм запускається в роботу при сигналізації про перевантаження однієї з черг вихідних PW каналів. Якщо реальні втрати пакетів хоча б в одному з вихідних каналів перевищують заданий поріг, це означає, що покращеного алгоритму кругового обслуговування недостатньо для забезпечення потрібного значення QoS. Тоді включається в роботу програма оптимізації розподілу інформаційних потоків. При цьому розв'язується задача мінімізації цільової функції

$$W_{over} = \min_{P_j} \sum_{i=1}^s a_i \sum_{j=1}^n x_{ij} P_{over\ ij} ,$$

де  $P_{over\ ij}$  — верхня межа ймовірності переповнення черги  $i$ -го типу трафіку в  $j$ -му каналі, яка розраховується за формулою (1);  $x_{ij}$  — долі сумарного інфор-

маційного потоку  $i$ -го типу, що направляються в  $j$ -й канал. Оптимізаційна задача вирішується при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, x_{ij} \geq 0, j = 1, 2, 3; \sum_{i=1}^2 a_i = 1, a_i \geq 0 .$$

Після проведення оптимізації необхідно перерахувати величину  $m$  для зміненого значення інтенсивності надходження інформаційного потоку:

$$\lambda_{ij\ new} = x_{ij} \lambda_i; \lambda_i = \sum_{k=1}^N \lambda_{ik} ,$$

де  $\lambda_i$  — кількість заявок на передачу  $i$ -го типу трафіку, що надходять від усіх базових станцій. Після того, як значення  $m$  розраховано, може бути запущено в роботу покращений алгоритм кругового обслуговування заявок.

Далі відновлюється моніторинг мережі, що розглядається, і аналізується структура багаторівневої системи керування маршрутизацією трафіку та ємністю каналів його передачі. Блок моніторингу мережі відслідковує інформацію про якість обслуговування абонентів, про зв'язність мережі, тощо. Якщо блок моніторингу мережі виявляє пошкодження ліній PW, то відповідним обладнанням здійснюється вибір альтернативного з'єднання. Інформація про вибраний шлях PW передається в блок керування мережею за протоколом PWE3.

Система керування інформаційними потоками за протоколом PWE3 забезпечує організацію з'єднань між комутаційними центрами PE1 та PE2, тобто виділяє канал PW для кожної БС, що обслуговується PE1. Розподіл каналного ресурсу в рамках одного PW здійснюється відповідно до заданого принципу обслуговування інформаційних потоків різних типів.

Модифікація багаторівневої системи керування інформаційними потоками та розподілом каналних ресурсів здійснюється таким чином, щоб мати можливість розподіляти інформаційний потік від всіх БС між вихідними PW відповідно до інформації про втрати пакетів в каналах зв'язку, а також динамічно розподіляти ємність каналу PW між інформаційними потоками різних типів завдяки виділенню  $m$  позицій у блоці з  $C_j$  ATM пакетів, що призначені для передачі у вихідний канал і які, в разі необхідності, надаються високопріоритетному або низькопріоритетному трафікам залежно від скорегованої інтенсивності вхідних потоків.

Ефективність запропонованого механізму комплексного керування інформаційними потоками досягається завдяки установці допоміжного облад-



нання, яке на блок-схемі системи керування, показаній на рис. 6, позначено як блок “Оптимізація маршрутизації”, що включає в себе блок “Визначення долей  $x_{ij}$ ”, які можуть бути знайдені шляхом розв’язання оптимізаційної задачі (2).

Коли оптимізаційна задача розв’язана, інформація про значення долей трафіків різних типів, які можуть бути направлені у вихідні PW тунелі, передається в блок керування мережею за протоколом PWE3.

Запропонована модифікація системи керування передбачає також встановлення обладнання, яке на блок-схемі, показаній на рис. 6, має назву “Вибір оптимального  $m$ ”. На основі отриманої інформації про змінені за формулою

$$\lambda_{ij\ new} = x_{ij} \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}$$

інтенсивності надходження заявок та інформації про ємності вихідних каналів PW цей блок розраховує оптимальне значення величини  $m$ .

Таким чином, додаткові блоки системи керування інформаційними потоками та каналними ресурсами позитивно впливають на розподіл трафіків між каналами PW і на розподіл смуги пропускання в середині PW.

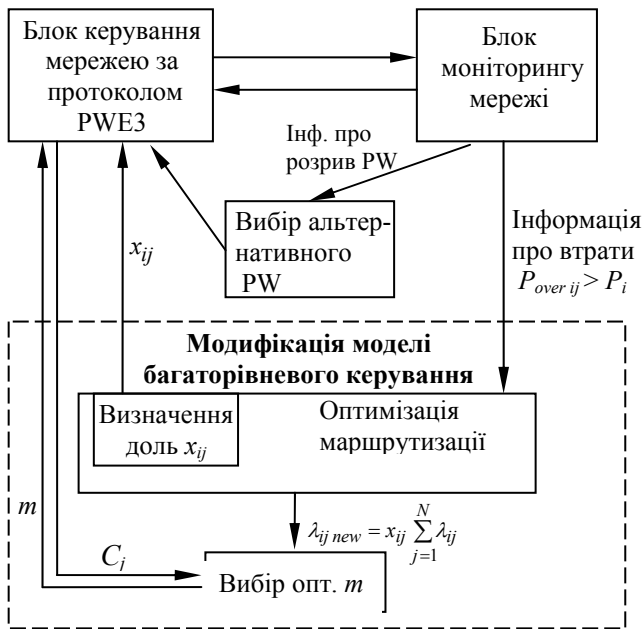


Рис. 6. Блок-схема системи керування інформаційними потоками PWE3 із запропонованою модифікацією

На рис. 7 наведено алгоритм багаторівневого керування із запропонованою модифікацією. Основними складовими алгоритму є блоки “Керування за протоколом PWE3”, “Оптимізація маршрутизації”,

“Розрахунок оптимального  $m$ ”. В рамках “Керування за протоколом PWE3” здійснюється моніторинг за показниками втрат інформаційних пакетів.

Якщо виконується умова  $P_{over\ ij} > P_i$ , де  $P_{over\ ij}$  – статистично визначений показник ймовірності втрат пакетів  $i$ -го типу в  $j$ -му каналі зв’язку;  $P_i$  – задані максимальні значення ймовірності втрат пакетів  $i$ -го типу трафіку, тоді за алгоритмом здійснюється оптимізація маршрутизації з розрахунком долей  $x_{ij}$ , що показують, яка частина сумарного інформаційного потоку  $i$ -го типу трафіку була направлена в  $j$ -й канал зв’язку.

Значення  $x_{ij}$  передаються в блок керування за протоколом PWE3 для здійснення оптимального розподілу інформаційних трафіків між вихідними PW каналами, а також в блок оптимізації розподілу кількості ATM пакетів різних типів трафіків, що будуть передаватися за одну трансакцію в канал PW. Для динамічного розподілу ємності каналу за вдосконаленим механізмом кругового обслуговування розраховується також значення величини  $m$ .

### Результати практичного застосування

Розглянемо транспортну мережу оператора мобільного зв’язку, де передача інформаційних потоків здійснюється за протоколом PWE3. Оптимізація проводиться в комутаційному центрі PE. На вхід комутаційного центру надходять інформаційні потоки від трьох базових станцій.

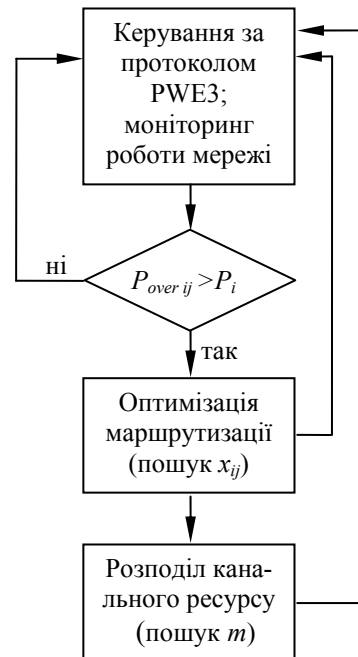


Рис. 7. Алгоритм багаторівневої вдосконаленої системи керування за протоколом PWE3

За протоколом PWE3 організуються виділені канали, які передають інформаційні потоки базових станцій через мережу з комутацією пакетів. Ємність таких каналів теоретично необмежена, але слід враховувати, що при збільшенні інтенсивності передавання інформаційних потоків зростає плата за користування транспортною мережею. Моделювання проводиться для прогнозованих значень ємності каналів, яка буде змінюватися залежно від інтенсивності вхідного потоку.

При моделюванні розглядається імітація технології АТМ, характерною особливістю якої є передача інформації пакетами фіксованої довжини. За протоколу одиницю в АТМ прийнято пакет фіксованої довжини, яка дорівнює 53 байти. Припустимо, що в систему надходять заявки на обслуговування трафіків інтерактивного відео та Інтернет. Ефективність динамічного перерозподілу навантаження між чергами у вихідних каналах зв'язку може бути доведена при застосуванні наступної схеми оцінки.

Нехай задані значення верхньої границі ймовірності гарантованого обслуговування дорівнюють: для трафіку інтерактивного відео  $P_V = 5 \cdot 10^{-6}$ , для Інтернет трафіку  $P_D = 10^{-6}$  з відповідними похибками  $\varepsilon_V = 3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_D = 3 \cdot 10^{-6}$ . Задаємо порогові значення для затримок пакетів відео трафіку  $T_V = 150$  мкс та пакетів трафіку даних  $T_D = 1000$  мкс.

На основі даних про затримки обчислюємо допустимі довжини черг для трафіку інтерактивного відео та трафіку даних  $h = T_i x_i$ ,  $i = (V, D)$ , де  $x_i$  — швидкість передачі трафіку (відео, даних) в каналі зв'язку (шукана змінна).

Знаходимо параметри  $\alpha_i$  Інтернет трафіку і трафіку інтерактивного відео з рівняння:

$$\tau_i = c_{0i} \sum_{l=1}^{\infty} l^{-\alpha_i},$$

де  $\tau_i$  — середня довжина повідомлення  $i$ -го типу трафіку (середній об'єм фільму або середній об'єм Інтернет сторінки в АТМ пакетах);  $c_{0i}$  — мінімальна довжина повідомлення  $i$ -го типу трафіку.

Задаємо мінімальну швидкість передачі інформації від абонента  $R_i = 2$  Мбіт/с, що відповідає передачі 49 АТМ пакетів за 10 мкс для відео трафіку та 1 АТМ пакета за 10 мкс для Інтернет трафіку.

Для прогнозованої кількості абонентів  $N$ , що хочуть передавати інформацію протягом години, розраховуємо інтенсивність надходження заявок за 10 мкс  $\lambda_i = N_i / 36000$ .

Розв'язуємо рівняння відносно  $x_i$  для трафіку інтерактивного відео та трафіку даних:

$$P_i = \frac{c_{0i} \lambda_i R_i^{\alpha_i}}{\alpha_i (\alpha_i - 1) (x_i - \lambda_i \tau_i)^{-\alpha_i + 1}}. \quad (5)$$

В результаті одержуємо потрібну швидкість передачі інформації в каналі зв'язку  $C_K = x_1 + x_2$ , без використання принципу обслуговування черг заявок.

Проведемо аналогічні розрахунки, але з використанням вдосконаленого принципу кругового обслуговування черг заявок. Порогові значення верхньої границі ймовірності гарантованого обслуговування покладемо рівними:  $P_{i \text{ пор}} = P_i + \varepsilon_i$ . Для заданих величин  $C_V = x_1$ ,  $C_D = x_2$  здійснюємо пошук значення  $m$  у відповідності з описаною вище процедурою.

Розрахунки за вдосконалим принципом кругового обслуговування черг заявок включають обчислення наступних ймовірностей за формулами, подібними до (5): ймовірності  $P_{V1}$  того, що черга відео трафіку буде переповнена, коли швидкість передачі відео інформації в каналі зв'язку стане рівною  $C_V$ , а довжина відповідної черги заявок становитиме  $h_V$ ; ймовірності  $P_{V2}$  того, що черга відео трафіку буде переповнена, коли швидкість передачі відео інформації в каналі зв'язку підвищиться до  $C_V + m$ , а довжина відповідної черги заявок зросте до величини  $h_V + m$ .

Обчислюємо різницю  $P_{V1} = P_{V1} - P_{V2}$ , яка є ймовірністю того, що пакети відео трафіку будуть обслуговуватися в черзі Інтернет трафіку. При значних відрізках часу  $t$  спостереження за системою  $P_{V1}$  є стаціонарною ймовірністю заняття пакетами відео трафіку резерву  $m$ .

Припустимо, що  $P_{D1}$  є ймовірність того, що черга трафіку даних довжиною  $h_D$  буде переповнена, коли швидкість передачі Інтернет даних в каналі зв'язку становитиме  $C_D - P_{V1} m$ , а  $P_{D2}$  є ймовірність того, що черга трафіку даних такої ж довжини буде переповнена, коли швидкість передачі Інтернет даних в каналі зв'язку буде дорівнювати  $C_D$ . Тоді різниця  $P_{DT} = P_{D1} - P_{D2}$  буде ймовірністю того, що пакети трафіку даних не зможуть бути обслужені через те, що весь резерв  $m$  виділяється на передачу відео трафіку.

Отже, без застосування вдосконаленого принципу кругового обслуговування черг забезпечується ймовірність гарантованого обслуговування заявок відео трафіку  $1 - P_{V2}$  і ймовірність обслуговування заявок Інтернет трафіку  $1 - P_{D1}$ . При цьому швидкість передачі інформації в каналі зв'язку, що забезпечує відповідні показники, становить  $C_D + C_V$ . Якщо ж застосувати вдосконалий принцип кру-

гового обслуговування черг заявок, то забезпечення таких показників якості досягається до швидкості передачі інформації в каналі зв'язку, яка дорівнює  $C_D + C_V + (1 - P_{VI})m$ .

Для ілюстрації ефективності вдосконаленого принципу зваженого кругового обслуговування черг розглянемо наступний приклад. Нехай 100 абонентів хочуть передавати відео трафік, а довжина черги складає 12662050 АТМ пакетів. Припустимо також, що 200 абонентів мають намір передавати Інтернет трафік, де довжина черги складає 250000 АТМ пакетів. Приймаючи до уваги обмеження на ймовірності втрат пакетів та параметри трафіків, було розраховано, що при використанні звичайного принципу кругового обслуговування черг для передачі відео трафіку потрібна швидкість передачі в каналі зв'язку 1100 Мбіт/с, а для передачі відео трафіку 750 Мбіт/с. Швидкість передачі, що необхідна для перерозподіленого навантаження  $m$  дорівнює 400 Мбіт/с.

Результати обчислень без застосування вдосконаленого принципу зваженого кругового обслуговування черг показують, що ймовірність того, що черга відео трафіку буде переповнена, коли швидкість передачі відео інформації в каналі зв'язку становить  $C_V = 1100$  Мбіт/с, а довжина відповідної черги дорівнює  $h_V = 12662050$  АТМ пакетів, складає  $P_{V1} = 1,008 \cdot 10^{-5}$ . Ймовірність того, що черга відео трафіку буде переповнена, коли швидкість передачі відео інформації в каналі зв'язку стане  $C_V + m$  при довжині відповідної черги  $h_V + m$ , буде дорівнювати  $P_{V2} = 0,542 \cdot 10^{-5}$ . Відповідно різниця ймовірностей становить  $P_{VI} = 0,466 \cdot 10^{-5}$ . Якщо застосовувати вдосконалений принцип кругового обслуговування черг заявок, то збереження таких показників забезпечується до швидкості передачі інформації в каналі зв'язку  $C_D + C_V + (1 - P_{VI})m = 1100 + 750 + (1 - 0,5 \cdot 10^{-5}) \cdot 200 = 2049$  Мбіт/с. Відповідна швидкість передачі інформації у вихідному каналі без застосування вдосконаленого принципу зваженого кругового обслуговування черг становить  $C_D + C_V = 1100 + 750 = 1850$  Мбіт/с.

Такий результат наглядно ілюструє ефективність вдосконаленого принципу зваженого кругового обслуговування черг.

### Висновки

Розроблено метод керування інформаційними потоками в комутаційних центрах РЕ телекомунікаційних мереж, які працюють за протоколом РВЕЗ. Запропонований метод дозволяє забезпечити постійний контроль за якістю передачі інформації, а також мінімізувати втрати пакетів, що викликані

переповненням черг заявок та перевищенням допустимого часу затримки пакетів для інтерактивних трафіків.

Розроблені рекомендації можуть бути застосовані для програмування роботи обладнання комутаційних центрів РЕ мобільних операторів зв'язку. Використання одержаних результатів дозволить організувати динамічний розподіл смуги пропускання між трафіком інтерактивного відео та трафіком даних, а також підтримувати втрати пакетів пріоритетного трафіку на заданому рівні при здійсненні контролю за якістю передачі непріоритетного трафіку.

Багаторівнева система керування маршрутизацією трафіком та пропускнуою здатністю каналів його передачі забезпечує необхідну якість передачі інформаційних потоків, коли система обслуговування черг не справляється із завданням забезпечення показників втрат пакетів нижче зазначеного рівня. При цьому застосовується оптимізація вузлової маршрутизації за критерієм мінімізації сумарних втрат пакетів.

### Література

1. Vegesna S. IP quality of service. — Cisco Press. Series: Networking Technology. — 2001. — 368 p.
2. Murad S. T., Teverovsky V., Willinger W. Estimators for long range dependence an empirical study // *Fractals*. — Vol 3, N. 4. — 1995. — P. 785–788.
3. Глоба Л. С., Доровських Д. А., Селівон Г. Ф., Скулиш М. А. Створення математичних моделей систем масового обслуговування для підтримки комбінованого потоку заявок в мережах мобільного зв'язку з високошвидкісною передачею даних підсистем АІС ДАІ // *Безпека дорожнього руху України*. — 2004. — № 1–2. — С. 128–147.
4. Глоба Л. С., Скулиш М. А.. Телефонний трафік. Постановка оптимізаційної задачі для мережі з емуляцією сервісу АТМ за протоколом РВЕЗ // *Моделювання та інформаційні технології*. — 2009. — Вип. 54. — С. 230–236.
5. Tsybakov B., Georganas N. D. Selfsimilar traffic and upper bounds to buffer overflow in an ATM queue. // *Performance Evaluation*. — 1998. — Vol. 36. — N. 1. — P. 57–80.
6. Глоба Л. С., Доровських Д. А., Скулиш М. А. Метод оцінки якості обслуговування абонентів систем мобільного зв'язку // *Електроніка и связь*. — 2006. — № 2. — С. 84–86.
7. Соколов Н. А. Выбор технологии коммутации для сетей следующего поколения // *Мобильные системы*. — 2004. — № 7. — С. 30–39.
8. Sowell F. Maximum likelihood estimation of stationary univariate fractionally integrated time series models // *Journal of Econometrics*. — 1992. — Vol. 53. — P. 165–188.

Надійшла до редакції 21.04.2010