

УДК 621.391

О.В. Лемешко<sup>1</sup>, О.Ю. Євсєєва<sup>2</sup>, Д.В. Симоненко<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

## МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ МЕРЕЖНИХ РЕСУРСІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ

У даній статті розглядається динамічна модель з балансуванням мережних ресурсів у телекомунікаційній мережі. Ця модель є розвитком моделі динамічного управління мережними ресурсами у просторі стану. Головними перевагами наведеної моделі є її динамічний характер, орієнтація на балансування не тільки каналних, але й буферних ресурсів а також наявність властивостей превентивного запобігання перевантаженням, що пов'язане з наявністю в динамічній моделі телекомунікаційної мережі властивостей прогнозування.

**Ключові слова:** каналні ресурси, балансування навантаження, гарантована якість обслуговування, трафік, потокова модель.

### Вступ

Фактор гарантованого забезпечення необхідної якості обслуговування (Quality of Service, QoS), що вийшов останнім часом на передній план, вимагає перегляду більшості існуючих підходів як до створення телекомунікаційних мереж (ТКМ), так й до їхньої експлуатації. Якщо на етапі проектування мережі зростаючі потреби користувачів до обсягів інформаційного трафіку, що передається, й до рівня якості цієї передачі можна задовольнити за рахунок виділення більших каналних ємностей, то на етапі функціонування ТКМ задача щодо забезпечення QoS в умовах існуючого обсягу мережних ресурсів вимагає пошуку й впровадження нових рішень.

На сьогоднішній день уже існує ряд окремих механізмів обробки трафіку, що реалізуються у вузлах мережі й сприяють у цілому забезпеченню QoS. Деякі з них успішно застосовуються провайдером мережних послуг на практиці. До таких механізмів належать механізми управління доступом (CAC, TS), управління пріоритетами, обслуговування черг

(WFQ, CBWFQ, CBQ, LLQ), запобігання перевантаженням (RED, WRED, ECN), методи стиснення та фрагментації пакетів (CRTP, LFI) [1]. Все перераховане являє собою тільки частину комплексного рішення проблеми QoS, у цілому ж наявність ізольованих механізмів в окремих вузлах недостатньо – необхідною умовою забезпечення QoS є їхня погоджена взаємодія. З цієї позиції засоби QoS можна розділити на три рівні (рис. 1):

1. Засоби управління ресурсами, що реалізовані в окремих елементах мережі, насамперед в її вузлах, та які забезпечують безпосередню обробку пакетів відповідно до заданого рівня QoS (усі вказані вище механізми).

2. Засоби, що координують роботу окремих мережних елементів – протоколи QoS-сигналізації та маршрутизації.

3. Централізовані функції політики, управління й обліку QoS, які дозволяють адміністраторам мережі цілеспрямовано впливати на мережні елементи для розподілу ресурсів мережі між різними класами трафіку відповідно до заданого рівня QoS.

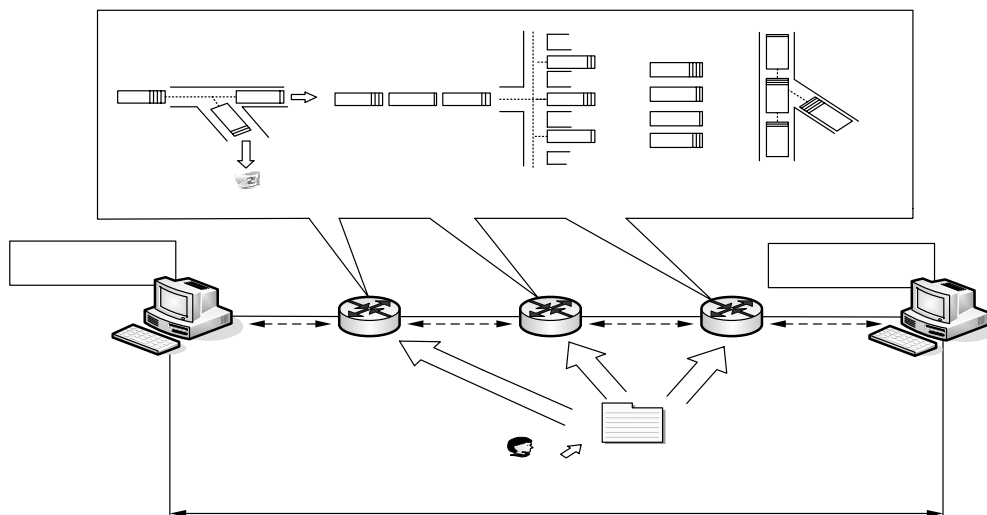


Рис. 1. Базова архітектура засобів QoS

Одним з найперспективніших напрямків у забезпеченні QoS є маршрутизація, яка в умовах існуючого стану розвитку даного питання вже повинна формулюватися як задача розподілу усіх видів мережних ресурсів, в першу чергу каналних і буферних, а також інформаційних, якими є власне сам мережний трафік.

### Аналіз відомих рішень щодо задачі розподілу ресурсів

В рамках задачі розподілу ресурсів на перший план виходить така умова, як досягнення максимально ефективного використання ресурсів. Узагальнено можна вважати ефективним таке використання ресурсів, за якого всі ресурси задіяні, але жоден з них не перевантажений. Зазначене є основною ідеєю концепції інженерингу трафіка (Traffic Engineering, TE), мету якої можна сформулювати як досягнення збалансованого використання всіх ресурсів мережі за рахунок раціонального розподілу трафіка. Умова збалансованого завантаження окремих ресурсів мережі може бути формалізована у різні способи. Наприклад, в специфікації RFC 2702 пропонується такий вираз для цільової функції щодо оптимізації розподілу ресурсів:

$$\min(\max K_i), \quad (1)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт використання  $i$ -го ресурсу.

Інший підхід пов'язаний з введенням деякого порогового значення використання ресурсів  $K_{\max}$ , тоді вимога щодо збалансованості розподілу вже формалізується не як цільова функція, а як обмеження виду  $K_i \leq K_{\max}$ .

Незважаючи на наявність формалізованих умов збалансованого навантаження, найголовнішою проблемою залишається досягнення такого розподілу, за якого ці умови будуть виконані. В цілому задачу збалансованого навантаження можна розв'язати у рамках моделей найкоротшого шляху та у рамках поточкових моделей.

Існуючі на сьогоднішній день рішення пов'язані саме з використанням першої групи моделей – моделей найкоротшого шляху, прикладом яких є алгоритм маршрутизації з обмеженнями CSPF. На практиці прагнення досягти збалансованості завантаження ТКМ реалізується використанням декількох маршрутів доведення трафіка (як з рівною вартістю, так і з нерівною), але знову ж таки в умовах моделей одного найкоротшого шляху, бо саме вони є математичною основою усіх поширених протоколів маршрутизації. Незважаючи на те, що моделі найкоротшого шляху за своєю сутністю є відносно простими, спроби використати їх для досягнення збалансованого розподілу ресурсів наштовхуються на ряд проблем. У першу чергу, це пов'язане з тим, що даний клас моделей не є орієнтованим на трафік, а тому в їх рамках не має узгодженості поміж задачами управління трафіком та іншими ресурсами, ці моделі не є динамічними, а тому вони не здатні відслідковувати поточний стан мережі.

На відміну від моделей найкоротшого шляху поточкові математичні моделі мають суттєві перева-

ги, головною серед яких є орієнтація на потоки трафіка, що надходить й передається мережею. Використання поточкових моделей дозволяє отримати теоретично обґрунтовані рішення щодо такого розподілу трафіку, за якого досягається як збалансоване використання мережних ресурсів, так й усувається сама можливість їх перевантаження. Прикладом поточної моделі, в рамках якої задача маршрутизації розглядається як задача розподілу каналних ресурсів, є модель, запропонована в роботі [2]. У ній в якості цільової функції обрано рекомендовану специфікацією RFC 2702 форму (1):

$$\min_X \beta, \quad (2)$$

де  $X$  – вектор, елементи якого  $X_{ij}^k$  відбивають частку  $k$ -го трафіку, що протікає трактом  $(i, j)$ ;  $\beta$  – максимальний поріг використання пропускної здатності трактив передачі мережі,  $\beta = \max_1 K_1$ ;  $K_1$  – коефіцієнт використання  $1$ -го тракту передачі (каналного ресурсу).

Кожна поточкова модель управління трафіком або маршрутизації обов'язково містить у собі поданий у тому чи іншому вигляді закон збереження потоку. У рамках моделі [2] він має вигляд

$$\begin{cases} \sum_{j(i,j) \in E} X_{ij}^k - \sum_{j(j,i) \in E} X_{ji}^k = 0 \text{ при } k \in L, i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j(i,j) \in E} X_{ij}^k - \sum_{j(j,i) \in E} X_{ji}^k = 1 \text{ при } k \in L, i = s_k; \\ \sum_{j(i,j) \in E} X_{ij}^k - \sum_{j(j,i) \in E} X_{ji}^k = -1 \text{ при } k \in L, i = d_k, \end{cases} \quad (3)$$

де  $L$  – множина трафіків в мережі;  $E$  – множина трактив передачі в ТКМ;  $s_k$  – вузол-відправник та  $d_k$  – вузол-отримувач для пакетів  $k$ -го трафіку.

Запобігання перевантаженню трактив передачі в рамках моделі [2] досягається за рахунок введення, а на етапі розв'язання обов'язкового виконання, наступної умови-обмеження

$$\sum_{k \in L} \lambda_k X_{ij}^k \leq \varphi_{ij} \beta \text{ за } \beta \geq 0; (i, j) \in E, \quad (4)$$

де  $\lambda_k$  – середня інтенсивність  $k$ -го трафіку;  $\varphi_{ij}$  – пропускна здатність тракту  $(i, j)$ .

Фізичний зміст змінної  $X_{ij}^k$  накладає додаткові обмеження, які можуть бути формалізованими у вигляді  $0 \leq X_{ij}^k \leq 1$  для випадку багатознакової маршрутизації або у вигляді  $X_{ij}^k \in \{0, 1\}$  для одношляхового способу доставки пакетів трафіку користувачів.

Відносна прозорість моделі [2] та можливість досягнути збалансованого розподілу каналних ресурсів за умови відомих середніх значень інтенсивностей трафіку, що надходять до мережі, є перевагами даної моделі. Але саме орієнтація тільки на середні показники без урахування динамічного характеру трафіку, а

також відсутність в розглянутій моделі урахування поточного стану черг на вузлах мережі спричиняють пошук або необхідність розробки нових математичних моделей. В таких умовах, як показує аналіз існуючих підходів до моделювання ТКМ [3], заслуговує на увагу клас динамічних потокових моделей, що базуються на диференційно-різницевих рівняннях стану.

### Математична модель динаміки інформаційного обміну в ТКМ

В рамках дискретної динамічної моделі в просторі стану [4, 5] динаміка ТКМ описується векторно-матричним рівнянням виду

$$\bar{x}(k+1) = \bar{x}(k) + V(k)\bar{u}(k) + \bar{y}(k), \quad (5)$$

де  $\bar{x}(k)$  –  $n_x$ -мірний вектор змінних стану у момент часу  $t_k$  ( $n_x = n(n-1)$ );  $n$  – кількість вузлів мережі;  $\bar{u}(k)$  –  $n_u$ -мірний вектор змінних управління, ( $n_u = n(n-1)^2$ );  $\bar{y}(k)$  –  $n_x$ -мірний вектор абонентського навантаження, що надходить на вузли ТКМ протягом часового інтервалу  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ;  $V(k)$  – матриця  $n_x \times n_u$ , що характеризує особливості структурної побудови, а також пропускні здатності її трактів передачі в момент часу  $t_k$  та протягом періоду  $\Delta t$ ;  $\Delta t$  – інтервал дискретизації, що є також періодом перерахунку змінних управління.

Фізично введені вектори  $\bar{x}(k)$  та  $\bar{u}(k)$  характеризують динамічний розподіл мережних (буферних та каналних) ресурсів на  $k$ -му часовому інтервалі  $\Delta t$ . Причому змінними стану є величини завантаження буферних пристроїв на маршрутизаторах ТКМ, що формалізуються у вигляді  $x_{i,j}(k)$  та відбивають обсяг даних, який перебуває у черзі на  $i$ -му вузлі й призначений для передачі до  $j$ -го вузла, в момент часу  $t_k$ . В якості змінних управління виступають  $u_{i,l}^j(k)$  – частки пропускної здатності тракту  $(i,l)$ , які виділено для передачі пакетів трафіку до  $j$ -го вузла в момент часу  $t_k$ . Саме ці змінні визначають порядок розподілу трафіку мережею, а їх пошук є метою розв'язання задачі розподілу ресурсів за умови заданої мережі, структурні особливості якої формалізуються у вигляді матриці  $V(k)$ , та за умови певного вхідного навантаження, що формалізується у вигляді вектора  $\bar{y}(k)$ .

Векторно-матричне рівняння (5) є системою лінійних неавтономних різницевих рівнянь завантаження буферів черг на мережних вузлах:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{l=1, l \neq i}^n b_{i,l}(k)u_{i,l}^j(k) + \sum_{v=1, v \neq i,j}^n b_{v,i}(k)u_{v,i}^j(k) + y_{i,j}(k), \quad (6)$$

де  $b_{v,i}(k) = c_{v,i}(k)\Delta t$ ,  $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k)\Delta t$ ,

( $k=0,1,\dots,a$ );  $c_{i,j}(k)$  – швидкість передачі даних в тракті  $(i,j)$  в момент часу  $t_k$ ;  $\zeta_{i,j}(k)$  – середня інтенсивність зовнішнього абонентського трафіку, що надходить до  $i$ -го вузла та призначений для  $j$ -го вузла, в момент часу  $t_k$ ;  $a$  – кількість інтервалів дискретизації у розрахунковому періоді  $a\Delta t$ .

Якщо введені вище змінні управління  $u_{i,l}^j(k)$  характеризують наданий обсяг каналних ресурсів, то доданок  $b_{i,l}(k)u_{i,l}^j(k)$  в рівнянні (6) визначає обсяг даних, який передається від вузла  $i$  до вузла  $l$  (але призначений для  $j$ ) за допомогою цих ресурсів.

Виходячи з фізичного змісту введених змінних стану та змінних динамічного управління мережними ресурсами з метою запобігання перевантаженню елементів ТКМ вони повинні підпорядковуватися таким обмеженням:

$$0 \leq x_{i,j}(k) \leq \alpha(k)x_{i,j}^{\max}, \quad (7)$$

$$0 \leq u_{i,l}^j(k) \leq 1, \quad (8)$$

де  $x_{i,j}^{\max}$  – обсяг буфера черги на  $i$ -му маршрутизаторі для пакетів, що очікують на передачу до  $j$ -го вузла мережі;  $\alpha$  – верхня динамічно керована межа використання черг на маршрутизаторах ТКМ.

З метою реалізації збалансованого завантаження трактів передачі ТКМ на змінні динамічного управління мережними ресурсами накладаються наступні інтегральні обмеження:

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n u_{i,l}^j(k) \leq \beta(k) \leq 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

де  $\beta(k)$  – верхня межа використання пропускної здатності трактів передачі ТКМ, що підлягає динамічному управлінню (вона є аналогом до  $\beta$  в моделі [2] з тією відмінністю, що оцінюється для кожного часового інтервалу).

В обмеженні (9) сума  $\sum_{j=1}^n u_{i,l}^j(k)$  практично є

коефіцієнтом використання каналних ресурсів тракту передачі  $(i,l)$ , в результаті виконання такого обмеження буде гарантувати, що в умовах високого вхідного навантаження (а саме в таких умовах виникає потреба в забезпеченні збалансованого розподілу ресурсів) всі тракти передачі будуть задіяні приблизно с однаковим коефіцієнтом  $\beta(k)$ .

### Формулювання задачі щодо оптимізації управління мережними ресурсами в ТКМ

В рамках викладеної вище динамічної моделі функціонування ТКМ (5) – (9) задача щодо управління мережними ресурсами може бути сформульована як оптимізаційна щодо пошуку екстремуму за наявності обмежень (5), (7) – (9) за векторними

( $\bar{x}(k)$ ,  $\bar{u}(k)$ ) та скалярними ( $\alpha(k)$  та  $\beta(k)$ ) змінними одного з двох наступних цільових функціоналів:

$$J_1(k) = \min_{x,u,\alpha,\beta} (r_\alpha(k)\alpha(k) + r_\beta(k)\beta(k)), \quad (10)$$

$$J_2 = \min_{x,u,\alpha,\beta} \sum_{k=1}^a (r_\alpha(k)\alpha(k) + r_\beta(k)\beta(k)), \quad (11)$$

де  $r_\alpha(k)$ ,  $r_\beta(k)$  – вагові (одночасно штрафні) коефіцієнти.

Серед запропонованих функціоналів перший  $J_1$  є термінальним, тобто він визначений тільки для одного (розрахункового) інтервалу дискретизації  $\Delta t$ , властивості щодо управління з прогнозуванням стану мережі в даному випадку не реалізовано. Другий функціонал орієнтований саме на реалізацію властивості прогнозування, що дозволяє здійснити розрахунки поточного розподілу трафіку з урахуванням навантаження, що очікується у наступні періоди  $\Delta t$ . Тут важливою є принципова можливість прогнозування величини навантаження, що надходить до транспортної мережі. Враховуючи, що існують помилки прогнозування, які збільшуються зі збільшенням номеру інтервалу  $\Delta t$  в інтервалі прогнозування  $T = a\Delta t$ , в другому функціоналі передбачається зменшення штрафних коефіцієнтів зі збільшенням номеру  $k$ , тобто  $r(k) > r(k+1)$ .

Особливістю запропонованої моделі є наявність в цільових функціоналах (10) та (11) доданків  $r_\alpha(k)\alpha(k)$ , за відсутності вирази (10) та (11) вони були б своєрідними аналогами до (2), а сама модель практично була б динамічною моделлю балансування каналних ресурсів. Але відсутність контролю за поточними розмірами черг у такій трактовці під час розв'язання прикладних задач може призвести до невиправданого зростання черг, за рахунок чого досягалася б «економія» каналних ресурсів. Тому виникає потреба введення до цільового функціоналу доданка, пов'язаного з розмірами черг, завдяки якому стає «невигідно» зберігати пакети того чи іншого трафіку на вузлах мережі, а потрібно якомога швидше доставити їх до отримувача. В результаті задача перетворюється на задачу балансування та розподілу не тільки каналних, але й буферних ресурсів, що в решті решт підвищує практичну значимість наведеної моделі.

З метою реалізації в рамках моделі (5)–(11) превентивного запобігання перевантаженням, тобто уповільнення темпів зростання розмірів черг, рекомендується  $r_\alpha(k) \gg r_\beta(k)$ . Завдання щодо вибору співвідношення між ваговими коефіцієнтами  $r_\alpha(k)$  та  $r_\beta(k)$  є самостійною задачею та вимагає проведення додаткових досліджень.

## Висновки

Таким чином, запропонована в статті динамічна математична модель балансування мережних ресурсів є розвитком моделі динамічного управління мережними ресурсами в просторі стану, що виник у відповідь на вимоги концепції Traffic Engineering. Головними перевагами запропонованої моделі, на відміну від раніше відомих, є її динамічний характер, орієнтація на балансування не тільки каналних, але й буферних ресурсів, наявність властивостей превентивного запобігання перевантаженням. Останньому сприяє декілька факторів, по-перше, це розширення цільового функціоналу за рахунок введення пов'язаного з розмірами черг доданка, по-друге, наявність в моделі ТКМ у просторі стану властивості прогнозування.

## Список літератури

1. Вегенія Ш. *Качество обслуживания в сетях IP*. Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 386 с.
2. Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya. *Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks // Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale. – 2001. – Vol. 2, №1. – P. 348-353.*
3. Поповский В.В., Лемешко А.В., Мельникова Л.И., Андрушко Д.В. *Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мульти-сервисных телекоммуникационных сетях // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4, Вып. 4. – С. 372-382.*
4. Segall A. *The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications. – 1975. – Vol. 25, №1. – P. 85-95.*
5. *Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За заг. ред. В.В. Поповського. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.*

Надійшла до редколегії 27.08.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Поповський, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

## МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСРОВКИ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

А.В. Лемешко, О.Ю. Евсева, Д.В. Симоненко

*В данной статье рассматривается динамическая модель с балансировкой сетевых ресурсов в телекоммуникационной сети. Предложенная модель является развитием модели динамического управления сетевыми ресурсами в пространстве состояния. Основными преимуществами данной модели выступают ее динамический характер, ориентация на балансировку не только канальных, но и буферных ресурсов, а также наличие свойств предотвращения перегрузок, что связано с наличием в динамической модели телекоммуникационной сети свойств прогнозирования.*

**Ключевые слова:** каналные ресурсы, гарантированное качество обслуживания, трафик, поточная модель.

## THE MODEL OF DYNAMIC BALANCING OF NETWORK RESOURCES IN A TELECOMMUNICATION NETWORK

A.V. Lemeshko, O.Y. Evseva, D.V. Symonenko

*In given article the dynamic model with balancing of network resources in a telecommunication network is considered. The offered model is development of model of dynamic management by network resources in condition space. As the basic advantages of the given model its dynamic character, orientation to balancing not only channel, but also buffer resources, and also presence of properties of prevention of overloads that is connected with presence in dynamic model of a telecommunication network of properties of forecasting act.*

**Keywords:** resources of channels, balancing of loading, quality of service, traffic, continuous flow model, is assured.