

УДК 004.451.5:621.391

Комарова Л. О., к.ф.-м.н.

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ. +380 (44) 249 25 54. lacosta\_k@ukr.net)

## АЛГОРИТМИ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ ДАНИХ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

**Комарова Л. О.** Алгоритми управління потоками даних у телекомунікаційній мережі реального часу. У статті пропонуються алгоритми динамічного управління потоками інформації як найбільш ефективні при врахуванні як імовірності зайнятості ліній зв'язку, так й їх фактичного стану для складання найкоротшого по терміновості чи достатнього по пропускній спроможності каналу між абонентами у телекомунікаційній мережі, що дозволяє підвищити оперативність передачі даних в умовах високого мережного навантаження. Приведений чисельний приклад вибору оптимального маршруту на телекомунікаційній мережі. Розглянуто і проаналізовано етапи умовної та безумовної оптимізації запропонованого алгоритму.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, потік даних, алгоритм управління, мережне навантаження

**Комарова Л. А.** Алгоритмы управления потоками данных в телекоммуникационной сети реального времени. В статье предлагаются алгоритмы динамического управления потоками информации, как наиболее эффективные при учете вероятности занятости линий связи, так и их фактического состояния для составления кратчайшего по срочности или достаточного по пропускной способности канала между абонентами в телекоммуникационной сети, что позволяет повысить оперативность передачи данных в условиях высокой сетевой нагрузки. Приведен численный пример выбора оптимального маршрута на телекоммуникационной сети. Рассмотрены и проанализированы этапы условной и безусловной оптимизации предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, поток данных, алгоритм управления, сетевая нагрузка

**Komarova L. O.** Algorithms of data flows management in the real time telecommunication network. The algorithms of dynamic management the streams of information, both most effective at an account probabilities of employment of flow lines, are offered in the article and their actual state for drafting of the most short-story on urgency or sufficient on a carrying capacity channel between subscribers in telecommunication network, that allows to promote the operationability of communication of data in the conditions of the high network loading. There is resulted numeral example of choice of optimum route on a telecommunication network. There is considered and analysed the stages of the constrained and absolute optimization of the offered algorithm.

**Keywords:** telecommunication network, data flows, management algorithm, network loading

**1. Постановка проблеми.** Управління потоками даних у телекомунікаційній мережі (ТМ) – це процес узгодження характеристик потоків даних і характеристик засобів, які обслуговують ці потоки, що здійснюється шляхом встановлення таких значень параметрів відповідних мережових елементів, при яких забезпечується доставка даних у мережі із заданою якістю обслуговування.

В інформаційних мережах (ІМ) автоматичної системи управління застосовуються такі методи просторової комутації – комутація каналів (КК) і комутація повідомлень (КП).

Метою статті є аналіз методів просторової комутації – комутації каналів і комутації повідомлень – щодо цільової ефективності, а також розгляд алгоритмів, які реалізуються комутаційною системою для забезпечення складання каналів, оптимальних по критерію швидкодії для повідомлень з певною категорією терміновості, по надійності доведення інформації чи по завантаженню ліній зв'язку пакетами даних.

**2. Методи просторової комутації.** Комутація каналів – це складання наскрізного каналу зв'язку між абонентами; при цьому спочатку в інформаційну мережу посиляється тільки службова (адресна) частина повідомлення, по котрій і складається для нього канал зв'язку (чи абонент спрямовується в чергу на обслуговування, чи отримує відмову), а потім, коли

канал складений, по ньому посилається інформаційна частина повідомлення. По скінченні обміну інформацією канал комутація з каналу знімається, і вільні лінії зв'язку використовуються для складення інших каналів.

Комутація повідомлень – це видача абонентом в найближчій вузол зв'язку (який його обслуговує) повністю всього повідомлення (чи його окремих пакетів), котре зберігається в буферній пам'яті даного вузла зв'язку (ВЗ), і по мірі звільнення ліній зв'язку в напрямку абонента – одержувача даного повідомлення воно передається суміжному ВЗ. Повідомлення, таким чином, “шукає” абонента, якому воно адресоване, поступово просуваючись по ІМ.

Мережа з КК потребує в декілька разів більше каналів, а ніж мережа з КП, і застосовується для обміну інформацією між однотипними по виду інформації та швидкості передачі повідомлень абонентами. В системах з КП повідомлення вищої категорії терміновості проходять швидше, ефективність завантаження ІМ значно підвищується, але при цьому утворюються умови для “обгону” повідомленнями з меншою категорією терміновості повідомлень з більшою категорією терміновості.

Для управління потоками інформації в ІМ алгоритми, що реалізує комутаційна система, забезпечують складання каналів, оптимальних по критерію швидкодії для повідомлень з певною категорією терміновості, по надійності доведення інформації чи по завантаженню ліній зв'язку пакетами даних.

При комутації каналів задача управління полягає у пошуку такої сукупності ліній зв'язку, котра дозволяє скласти оптимальний канал на час обміну інформацією між абонентами. При комутації повідомлень задача управління полягає у пошуку сукупності ліній зв'язку, яка дає оптимальний канал при послідовному просуванні повідомлення по ІМ. Таким чином, при КК потрібен великий об'єм службової інформації про фактичний стан ліній зв'язку (вільна, занята), і витрати часу на організацію каналу можуть бути значними. При КП потрібне лише врахування статистичної інформації про занятість ліній зв'язку; в адресній частині повідомлення вказуються послідовно вузли зв'язку (чи лінії зв'язку), через які повинне пройти повідомлення (маршрут на ІМ).

Для передачі повідомлень з вищою категорією терміновості в АСУ використовується алгоритм циркулярної передачі (“хвиля”); при цьому повідомлення видається від абонента в усі лінії зв'язку одночасно і розповсюджується по ІМ по усім можливим каналам.

Перевагами “хвильового” алгоритму передачі є наступні:

- доведення повідомлення до абонента-одержувача за мінімальний час (оскільки один із повної множини каналів завжди станеться оптимальним);
- висока надійність доведення повідомлення, що визначається імовірністю здатного стану хоча б одного з повної множини каналів;
- відсутність необхідності збору службової інформації про стан ліній зв'язку і вирішення задачі управління рухом повідомлення по ІМ.

Але циркулярна передача повідомлення приводить до максимального завантаження ІМ єдиним повідомленням.

### **3. Алгоритм управління щодо вибору оптимального каналу передачі повідомлення.**

Нехай для ІМ відома матриця середнього часу  $\tau$  передачі 1 повідомлення (пакета) по кожній лінії зв'язку, тобто між  $n$  суміжними вузлами

$$(d_i, d_j): T = \|\tau_{ij}\|_{n \times n}.$$

Для передачі повідомлення між абонентами  $(a_r, a_s)$  даної ІМ на множині можливих “управлінь”  $\{U\}$  (щодо складання каналу зв’язку), кожне з котрих є вектор – ланцюг  $k = n - 1$  дуг-ліній зв’язку між  $(a_r, a_s)$  матриці суміжності вершин-вузлів ІМ:

$$U = \|u_{ij}\|_{n \times n},$$

де  $u_{ij}$  – вибрана лінія зв’язку на  $k$ -й ділянці каналу, “придатне” для наявної структури ІМ, потрібно знайти таке (оптимальне) управління (скласти канал)

$$U^o = \|u_{ij}^o\|, U^o \subset \{U\},$$

при якому витрати часу на передачу повідомлення між даними абонентами мінімальні:

$$T(a_r, a_s, U^o) = \min_{(U)} T(U) = \sum_{u_{ij}^o \in U^o} \tau_{ij}(u_{ij}^o).$$

Це – задача динамічного програмування з адитивною функцією ефекту.

Функціональне рівняння Беллмана для етапу умовної оптимізації, адаптоване для даної задачі, має вигляд:

$$T_k(d_i^{(k)}, u_{ij}^o) = \min_{\{u_{ij}\}} \{ \tau_{ij}(d_i^{(k)}, u_{ij}) + T_{k+1}(d_i^{(k+1)}, u_{ij}) \}, k = \overline{s, r}, \quad (1)$$

де  $d_i^{(k)}, d_i^{(k+1)}$  – суміжні вузли зв’язку для  $k$ -ї ділянки каналу;

$T_k, T_{k+1}$  – “потенціали” (рівень ефекту) суміжних вузлів зв’язку для  $k$ -ї ділянки каналу;

$u_{ij}^o$  – умовне оптимальне управління для  $k$ -ї ділянки каналу.

Якщо для ІМ відома матриця імовірності незанятості ліній зв’язку між суміжними вузлами  $P = \|p_{ij}\|_{n \times n}$ , то складання каналу з максимальною імовірністю його незанятості потребує пошуку такого (оптимального по даному критерію) управління  $U^o$ , при якому

$$P(a_r, a_s, U^o) = \max_{\{U\}} P(U) = \prod_{u_{ij}^o \in U^o} p_{ij}(u_{ij}^o).$$

Це – задача динамічного програмування з мультиплікативною функцією ефекту. Функціональне рівняння Беллмана для етапу умовної оптимізації, адаптоване для даної задачі, має вигляд:

$$P_k(d_i^{(k)}, u_{ij}^o) = \max_{\{u_{ij}\}} \{ p_{ij}(d_i^{(k)}, u_{ij}) \times P_{k+1}(d_i^{(k+1)}, u_{ij}) \}, k = \overline{s, r}, \quad (2)$$

де  $d_i^{(k)}, d_i^{(k+1)}$  – суміжні вузли зв’язку для  $k$ -ї ділянки каналу;

$P_k, P_{k+1}$  – “потенціали” (рівень ефекту) суміжних вузлів зв’язку для  $k$ -ї ділянки каналу;

$u_{ij}^o$  – умовне оптимальне управління (напрямок) для  $k$ -ї ділянки каналу.

**4. Приклад вибору оптимального маршруту.** Розглянемо простіший чисельний приклад вибору оптимального маршруту на телекомунікаційній мережі (ТМ), фрагмент якої умовно завданий вузлами  $(s1, \dots, s9)$  та ділянками мережі між даними вузлами, “вагою” яких є час передачі повідомлення між відповідними вузлами ТМ (Рис. 1).

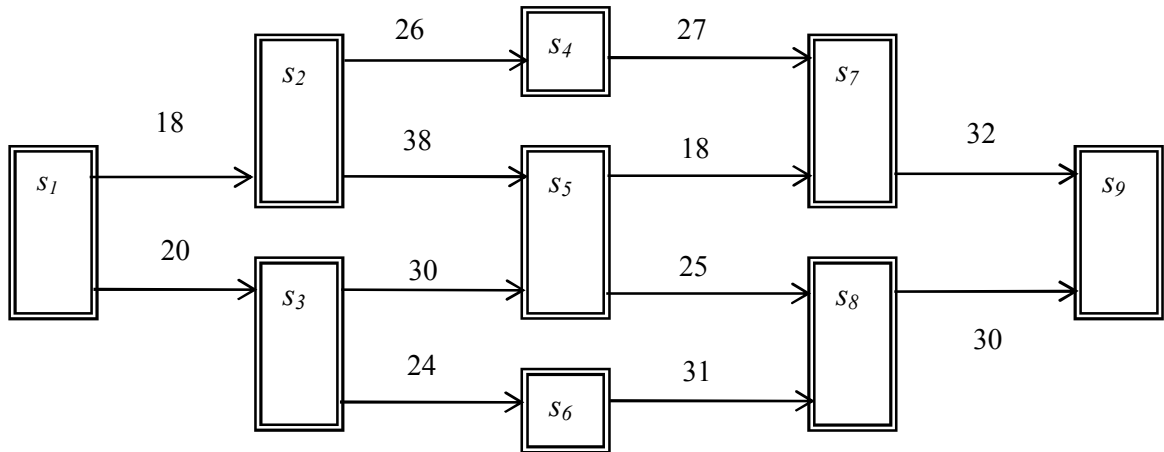


Рис. 1. Транспортна мережа як орієнтований граф мережевого типу

Для передачі повідомлення вищої категорії терміновості потрібно обрати (оптимальний) маршрут, для якого сумарні витрати часу на передачу повідомлення по лініях зв'язку між абонентами (вузлами) мінімальні.

Для завданої ІМ складаємо напівматрицю питомих витрат часу на передачу повідомлення по лініям зв'язку між суміжними вузлами (Рис. 2).

$$T_{n \times n}(S) = \|\tau_{ij}\|_{n \times n} = \begin{bmatrix} & s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 & s_7 & s_8 \\ s_1 & 0 & 18 & 20 & & & & & \\ s_2 & & 0 & & 26 & 30 & & & \\ s_3 & & & 0 & & 30 & 24 & & \\ s_4 & & & & 0 & & & 27 & \\ s_5 & & & & & 0 & & 18 & 25 \\ s_6 & & & & & & 0 & & 31 \\ s_7 & & & & & & & 0 & \\ s_8 & & & & & & & & 0 \\ s_9 & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

Аналіз похідних даних задачі свідчить про те, що множина можливих маршрутів  $\{S\}$  між початковим вузлом  $s_1$  і кінцевим вузлом  $s_9$  є обмеженою (5 маршрутів), цільова функція за фізичним змістом (час передачі повідомлення по маршруту) є адитивною, а оптимальне рішення (оптимальний маршрут) повинне мінімізувати цільову функцію:

$$T(S^o) = \min_{\{S\}} T(S) = \sum_{(s_i, s_j) \subset S^o} \tau_{ij}^o, \quad S^o \subset \{S\}.$$

Тому застосовуємо метод динамічного програмування для “просторової” задачі оптимального управління.

4.1. **Етап умовної оптимізації.** Починається вирішення задачі вибору оптимального маршруту з етапу умовної оптимізації (Рис. 3).

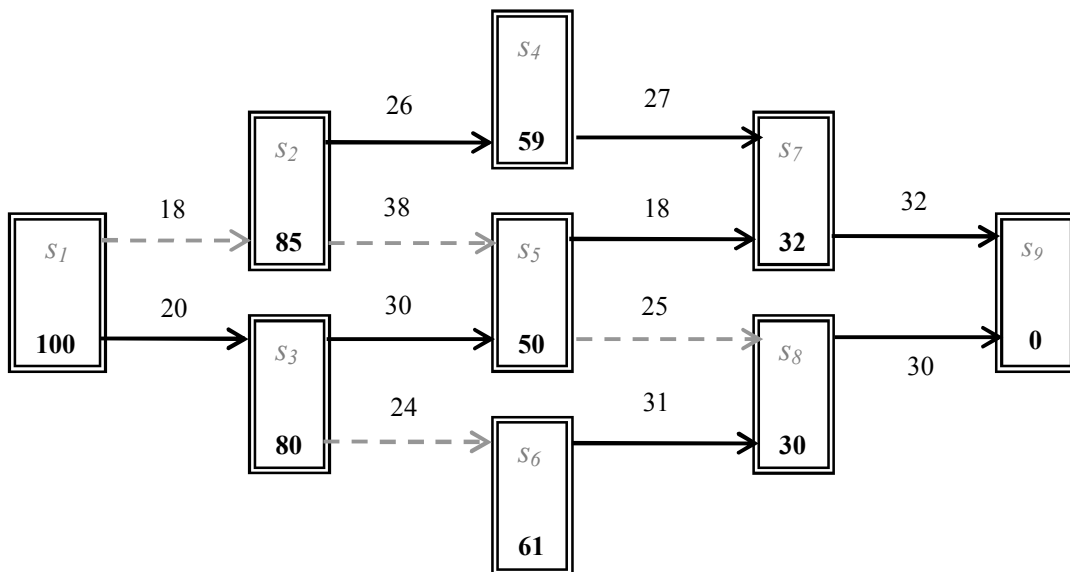


Рис. 3. Етап умовної оптимізації

Знайдемо потенціали усіх вузлів ТМ та відповідні до них оптимальні “крокові” напрямки, починаючи з кінцевого вузла і закінчуючи початковим.

Присвоюємо потенціалу кінцевого вузла значення  $T(s_9)=0$ .

Тепер, користуючись похідними даними ТМ (Рис. 1), послідовно, починаючи з  $s_8$  і закінчуючи  $s_1$ , знайдемо потенціали решти вершин (вузлів) та умовні оптимальні напрямки із кожного вузла, обчислюючи їх по формулі функціоналу Беллмана для адитивної функції ефекту (1). Маємо:

$$\begin{aligned}
 T(x_8, r_{89}) &= \min (\tau_{89} + D(x_9) = 30 + 0 = 30) = 30 \\
 T(x_7, r_{79}) &= \min (\tau_{79} + D(x_9) = 32 + 0 = 32) = 32 \\
 T(x_6, r_{68}) &= \min (\tau_{68} + D(x_8) = 31 + 30 = 61) = 61 \\
 T(x_5, r_{57}) &= \min \left\{ \begin{aligned} \tau_{57} + D(x_7) &= 18 + 32 = 50 \\ \tau_{58} + D(x_8) &= 25 + 30 = 55 \end{aligned} \right\} = 50 \\
 T(x_4, r_{47}) &= \min (\tau_{47} + D(x_7) = 57 + 32 = 59) = 59 \\
 T(x_3, r_{35}) &= \min \left\{ \begin{aligned} \tau_{35} + D(x_5) &= 30 + 50 = 80 \\ \tau_{36} + D(x_6) &= 24 + 61 = 85 \end{aligned} \right\} = 80 \\
 T(x_2, r_{24}) &= \min \left\{ \begin{aligned} \tau_{24} + D(x_4) &= 26 + 59 = 85 \\ \tau_{25} + D(x_5) &= 38 + 50 = 88 \end{aligned} \right\} = 85 \\
 T(x_1, r_{13}) &= \min \left\{ \begin{aligned} \tau_{12} + D(x_2) &= 18 + 85 = 103 \\ \tau_{13} + D(x_3) &= 20 + 80 = 100 \end{aligned} \right\} = 100.
 \end{aligned}$$

На Рис. 3 знайдені значення потенціалів  $D$  заносимо (жирним шрифтом) у клітини вузів; відповідні до них “умовно оптимальні” і вихідні дуги (крокові напрямки) позначаємо жирним шрифтом; неоптимальні вихідні дуги (крокові напрямки) виділяємо сірим кольором, бо вони гарантовано не належать до оптимального маршруту і не повинні

розглядатися (робимо їх штриховими) на етапі безумовної оптимізації – пошуку саме безумовного оптимального багатокрокового управління щодо переводу об’єкта із початкового стану (вузла  $s_1$ ) в кінцевий стан (вузол  $s_9$ ) з максимальною ефективністю (з мінімальними витратами на перевід).

Таким чином, на етапі умовної оптимізації знайдений “потенціал” початкового вузла ТМ, який є екстремальним значенням цільової функції, тобто дорівнює мінімальній протяжності оптимального маршруту. Усі похідні дані для етапу безумовної оптимізації містить ТМ після умовної оптимізації (Рис. 3).

**4.2. Етап безумовної оптимізації.** Переходимо до етапу безумовної оптимізації – визначенню ділянок (дуг) з умовними оптимальними напрямками, які належать тільки оптимальному маршруту.

Єдиний безумовний оптимальний маршрут, який починається із вузла (вершини)  $s_1$  і закінчується в  $s_9$ , складає, як видно з Рис. 4, наступна послідовність умовних оптимальних дуг (чи інцидентих до них вузлів):

$$S^o = \langle r_{13}, r_{35}, r_{57}, r_{79} \rangle = \langle s_1, s_3, s_5, s_7, s_9 \rangle .$$

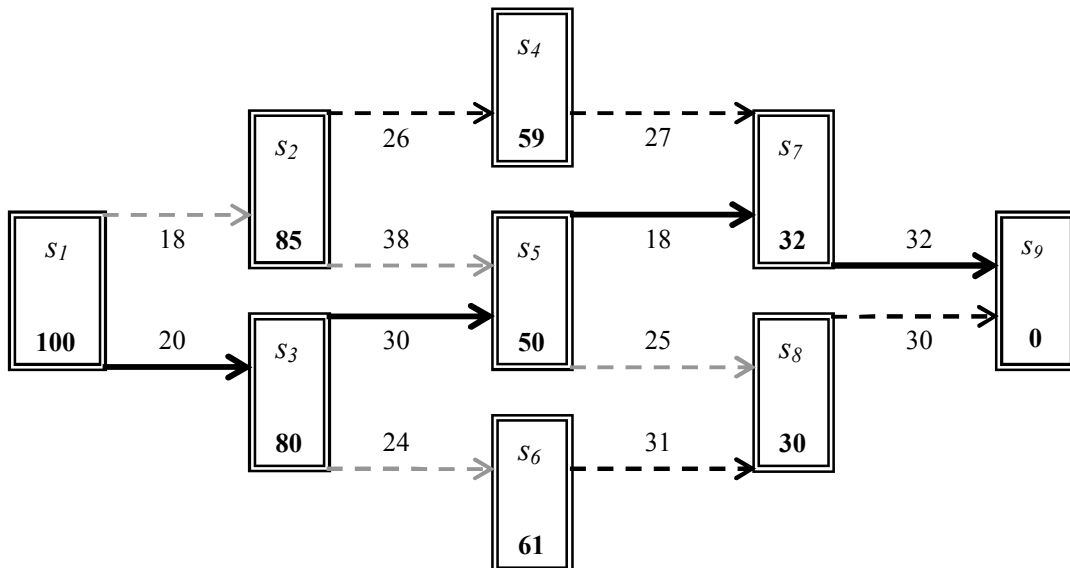


Рис. 4. Етап безумовної оптимізації

Оптимальний маршрут показаний ланцюгом неперервних дуг, що з’єднує початкову і кінцеву вершини графу. Потенціали вершин відповідають мінімальній їх відстані від кінцевої вершини на оптимальному маршруті.

Мінімальна довжина оптимального маршруту, яка є “потенціалом” початкової вершини  $T(s_1)$ , була знайдена ще на етапі умовної оптимізації. Вона дорівнює

$$T(S^o) = T(x_1) = \sum_{ij \in S^o} \tau_{ij} = (20 + 30 + 18 + 32) = 100 \text{ [од. часу]}$$

Особливістю даного методу ДП вибору маршруту, в порівнянні з евристичними методами аналізу потоків на мережах (Форда-Фалкерсона) та методом “гілок й границь”, є одержання “вкладених” оптимальних рішень (для усіх вузлів відносно кінцевого) та його простота при алгоритмічній реалізації.

Аналогічним чином вирішується задача вибору оптимального маршруту по іншому критерію – наприклад, максимуму ймовірності незайнятості ліній зв'язку маршруту, тобто ймовірності події, що канал передачі даного маршруту буде вільним. При цьому повинна бути відома матриця статистичних значень зайнятості ліній зв'язку ТМ

$$Q(S) = \prod_{i,j} q_{ij},$$

а цільова функція буде мультиплікативною формою, яка мінімізується для оптимального маршруту:

$$Q(S^o) = \min_{\{S\}} Q(S) = \prod_{(si,sj) \in S^o} q_{ij}^o, \quad S^o \subset \{S\}. \quad (3)$$

Присвоюємо потенціалу кінцевого вузла значення, оскільки він, як співмножник добутку (3), не може бути нулем по фізичному змісту:

$$Q(s_9) = 1.$$

На етапі умовної оптимізації обчислюємо потенціали вузлів по формулі функціоналу Беллмана для мультиплікативної функції (2), за допомогою яких визначаємо умовні оптимальні «крокові» напрямки (єдині лінії зв'язку), що виходять з даних вузлів.

На етапі безумовної оптимізації визначаємо, починаючи з вузла  $s1$ , ділянки маршруту (лінії зв'язку) з умовними оптимальними напрямками, які належать тільки оптимальному маршруту.

**Висновок.** Таким чином, алгоритми динамічного управління потоками інформації є найбільш ефективними при врахуванні як ймовірності зайнятості ліній зв'язку, так й їх фактичного стану для складання найкоротшого по терміновості чи достатнього по пропускну здатності каналу між абонентами. Зрозуміло, що вирішення подібних задач управління потоками на ІМ потребує використання управляючих обчислюваних машин в центрах комутації ІМ.

### Література

1. Смирнов А. А. Анализ и сравнительное исследование перспективных направлений развития цифровых и телекоммуникационных систем и сетей. / А. А. Смирнов, В. В. Босько, Е. В. Мелешко // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 7(74). – С. 120-123.
2. Семенов С. Г. Сравнительные исследования и анализ алгоритмов управления очередями в многопротокольных узлах связи телекоммуникационной сети / С. Г. Семенов, В. В. Босько, Е. В. Мелешко // Збірник тез та доповідей шостої наукової конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору». – Харків : ХУПС. – 2010. – С. 132-133.
3. Polschikov K. Technique of modeling the intensity of the real time traffic in a telecommunication network channel with switching packages / K. Polschikov, N. Rvachova, K. Lubchenko // Radioelectronic and Computer Systems. – 2010. – Vol. 6 (47). – P. 312-315.
4. Стеклов В. К. Инвариантность в системах управления при неполной априорной информации / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, А. К. Юдин // Зв'язок. – 2002. – №6(38). – С.48-55.

Дата надходження в редакцію: 21.03.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л. Н. Беркман