

УДК 621.391

ПОТОКОВЫЕ МОДЕЛИ МНОГОАДРЕСНОЙ И ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#), [К.М. АРУС](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – Flow models of multicast and broadcast routing in telecommunications networks are proposed. The novelty of models lies in description of multiproduct case, as well as in consideration of flowing nature of modern network traffic, allowing to implement previously known conditions for prevent communication channels overload prevention for the case of multicast and broadcast routing type. The models are represented by a system of linear equations and inequalities, which makes them quite effective in terms of computer implementation. As part of the proposed models, problems of multicast and broadcast routing are focused on solving optimization problems of Boolean programming. The example shows efficiency of the proposed models in terms of service simultaneously multiple traffics with different characteristics, models adaptation to changes in network parameters (channel capacity). The proposed model can be used directly for solving the broadcast and multicast routing problems, and the mathematical description of more complex processes and problems, such as those associated with the design of telecommunications networks, where routing problem complement other important network tasks (selection of topology and bandwidth of communication channels).

Анотація – Запропоновано поточкові моделі багатоадресної та ширококомовної маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Новизна моделей полягає в описі багатопродуктового випадку, а також в обліку поточкового (мультипоточкового) характеру сучасного мережного трафіка, що дозволило і для випадку багатоадресної та ширококомовної маршрутизації ввести раніше відомі умови запобігання перевантаження каналів зв'язку. Моделі представлені системою лінійних рівнянь і нерівностей, що робить їх застосування досить ефективним з точки зору обчислювальної реалізації. У рамках запропонованих моделей задачі багатоадресної та ширококомовної маршрутизації зведені до розв'язання оптимізаційних задач булевого програмування.

Аннотация – Предложены потоковые модели многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях. Новизна моделей состоит в описании многопродуктового случая, а также в учете потокового (мультипоточкового) характера современного сетевого трафика, что позволило и для случая многоадресной и широковещательной маршрутизации ввести ранее известные условия предотвращения перегрузки каналов связи. Модели представлены системой линейных уравнений и неравенств, что делает их применение достаточно эффективным с точки зрения вычислительной реализации. В рамках предложенных моделей задачи многоадресной и широковещательной маршрутизации сведены к решению оптимизационных задач булевого программирования.

Введение

Маршрутизация была и остается одной из важнейших сетевых задач, от эффективности решения которой во многом зависят численные значения ключевых показателей как межконцевого (end-to-end) качества обслуживания (Quality of Service, QoS) – скорости передачи, средней задержки, джиттера и числа потерянных пакетов, так и качества обслуживания, воспринимаемого пользователем (Quality of Experience, QoE). При этом особая роль в архитектуре QoS/QoE отводится средствам

широковещательной (broadcast) и многоадресной (multicast) маршрутизации [1-4], которые активно используются при передаче трафика таких приложений как IPTV, дистанционное обучение, репликация баз данных и информации веб-сайтов, рассылка корпоративной информации и др. При этом в отличие от одноадресной (unicast) маршрутизации (рис. 1 а), при которой необходимо рассчитывать маршрут между фиксированной парой узлов отправитель-получатель, при широковещательной рассылке пакеты передаются от одного сетевого узла ко всем остальным (рис. 1 б), а при многоадресной – от одного ко многим (рис. 1 в).

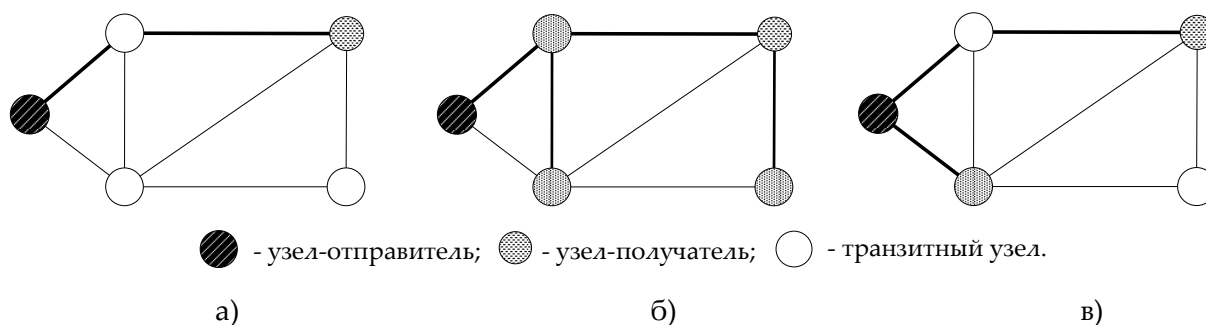


Рис. 1. Примеры одноадресной (а), широковещательной (б) и многоадресной (в) маршрутизации

В настоящее время на практике используется достаточно широкое множество протоколов широковещательной и многоадресной маршрутизации, например, DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol), Multicast Extensions to OSPF (MOSPF), PIM (Protocol Independent Multicast). Подобные протокольные решения, как правило, являются дальнейшим развитием известных протоколов одноадресной маршрутизации и основываются на графовых моделях расчета минимального (кратчайшего) дерева [3]. Неоспоримым преимуществом обеспечиваемых таким образом решений является их невысокая и, в общем случае, прогнозируемая вычислительная сложность. Однако при реализации обслуживания мультиточечного трафика с учетом необходимости предотвращения возможных перегрузок телекоммуникационной сети (ТКС) внимание ученых и разработчиков сетевого оборудования все больше уделяется именно потоковым моделям (flow-based model), аналитически представленных алгебраическими [3, 4], дифференциальными [5, 6] уравнениями состояния сети. При этом аналитическое описание потоковой модели маршрутизации является важным условием при решении и других телекоммуникационных задач обеспечения качества обслуживания (резервирования ресурсов, профилирования трафика [7]) и проектирования ТКС [8].

В этой связи целью данной работы является разработка потоковых моделей многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях, представленных, для примера, линейными алгебраическими уравнениями и неравенствами.

I. Потокковая модель многоадресной маршрутизации

Пусть при разработке модели многоадресной маршрутизации структура ТКС описывается с помощью ориентированного графа $\Gamma = (V, E)$, где $V = \{v_i, i = \overline{1, m}\}$ – множество вершин – узлов (маршрутизаторов) сети, а $(i, j) \in E$ – множество дуг графа, моделирующих каналы связи (КС) ТКС. Для каждого КС, моделируемого дугой $(i, j) \in E$, задана пропускная способность, измеряемая в пакетах в секунду (1/с), которая будет обозначаться как $\varphi_{(i,j)}$. С каждым k -м трафиком (потокком) связано ряд параметров: r_k – средняя интенсивность трафика на входе в сеть; s_k – узел-отправитель;

$$d_k^* = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m_k}\} \quad (1)$$

– множество узлов-получателей, где m_k – число получателей для k -го трафика.

В ходе решения задачи многоадресной маршрутизации необходимо рассчитать множество булевых переменных

$$x_{(i,j)}^k \in \{0;1\}, \quad (2)$$

каждая из которых характеризует долю интенсивности k -го трафика в КС $(i, j) \in E$; $k \in K$, где K – множество трафиков в сети.

На маршрутные переменные (2) накладываются ряд ограничений:

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \geq 1 \quad \text{при } k \in K, v_i = s_k, \quad (3)$$

а также

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k = 1 \quad \text{при } k \in K; v_j \in d_k^*. \quad (4)$$

Ограничение (3) вводится для узла-отправителя, а его выполнение ориентирует на то, что от этого узла трафик, поступающий на обслуживание, будет передан хотя бы одному смежному узлу. Условие (4) нацелено на обеспечение доставки пакетов трафика на каждый узел-получатель, причем трафик должен поступать на эти узлы лишь с одного смежного узла.

Для каждого транзитного узла $v_j \in V$, в качестве которого может выступать любой узел, кроме отправителя, дополнительно вводятся следующие условия:

$$\sum_{i:(i,j) \in E} x_{(i,j)}^k \geq x_{(j,p)}^k \quad \text{при } k \in K; v_j \notin s_k, \quad (5)$$

выполнение которых делает возможным наличие трафика в любом из исходящих от транзитного узла каналах связи $((j, p) \in E)$ лишь в том случае, когда этот трафик поступает на этот узел хотя бы через один входящий КС $((i, j) \in E)$.

Если на структуре сети возможно образование контуров (циклов), то при выполнении условий (2)-(5) не будет обеспечиваться связность отдельных каналов в

маршрут. Для предотвращения образования контуров в предлагаемую модель вводятся условия (по числу контуров в сети) вида

$$\sum_{(i,j) \in E_{\pi}^i} x_{(i,j)}^k < |E_{\pi}^i|, \quad (6)$$

где E_{π}^i – множество дуг графа, образующих в соответствии со своей ориентацией i -й контур (π); $|E_{\pi}^i|$ – мощность множества E_{π}^i . Выполнение условия (6) гарантирует, что число задействованных в ходе многоадресной маршрутизации дуг, составляющих той или иной контур, всегда меньше общего количества дуг в этом контуре, т.е. контур в рассчитываемый маршрут не входит.

С целью недопущения перегрузки каналов связи маршрутизируемым трафиком необходимо выполнить следующие условия:

$$\sum_{k \in K} r_k x_{(i,j)}^k \leq \varphi_{(i,j)}, \quad (i,j) \in E. \quad (7)$$

Для расчета оптимального множества путей при многоадресной маршрутизации для примера в качестве критерия используем линейный критерий вида

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} f_{(i,j)}^k x_{(i,j)}^k \Rightarrow \min, \quad (8)$$

где $f_{(i,j)}^k$ – маршрутная метрика, характеризующая структурно-функциональные параметры канала связи $(i,j) \in E$.

II. Потокковая модель широковещательной маршрутизации

При разработке потокковой модели широковещательной маршрутизации с каждым k -м трафиком (потокком) связан также ряд параметров: средняя интенсивность (r_k) на входе в сеть; узел-отправитель (s_k) и расширенное по сравнению с (1) множество узлов-получателей пакетов

$$d_k^{**} = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^{m-1}\}, \quad (9)$$

т.е. все узлы, кроме s_k .

В ходе решения задачи широковещательной маршрутизации также необходимо рассчитать множество булевых маршрутных переменных $x_{(i,j)}^k$ (2), на которые накладываются ограничения, аналогичные (3), (4), (6) и (7), с сохранением ранее вкладываемого физического смысла. При этом стоит учесть, что ввиду того, что условие (4) касается всех узлов сети (кроме узла-отправителя), т.е. $v_j \in d_k^{**}$, то в потокковой модели широковещательной маршрутизации нет необходимости в дополнительном введении условий (5), т.к. в каждый узел сети (9) «по умолчанию» поступает трафик заданной интенсивности r_k (4).

III. Анализ решений задач многоадресной и широковещательной маршрутизации с использованием предложенных моделей

Результаты анализа решений задач многоадресной и широковещательной маршрутизации с использованием предложенных потоковых моделей продемонстрированы на ряде расчетных примеров. В каждом из примеров рассмотрен одноили многопродуктовый (для наглядности двухпродуктовый) случай, когда в качестве узла-отправителя выступал первый маршрутизатор, от которого к маршрутизаторам-получателям необходимо было передать пакеты трафика с некоторой интенсивностью. Для однопродуктового случая (при обслуживании одного трафика) в разрывах дуг указана дробь, в которой в числителе приведена пропускная способность (1/с) данного КС, а в знаменателе – интенсивность протекающего в данном канале трафика.

На рис. 2 представлен пример решения задачи многоадресной маршрутизации, подтверждающий необходимость введения условий (6). В данном примере рассматривалась ТКС с симплексными каналами связи, когда первый маршрутизатор выступал как узел-отправитель, а третий, четвертый и пятый маршрутизаторы – узлы-получатели. Интенсивность трафика – 120 1/с.

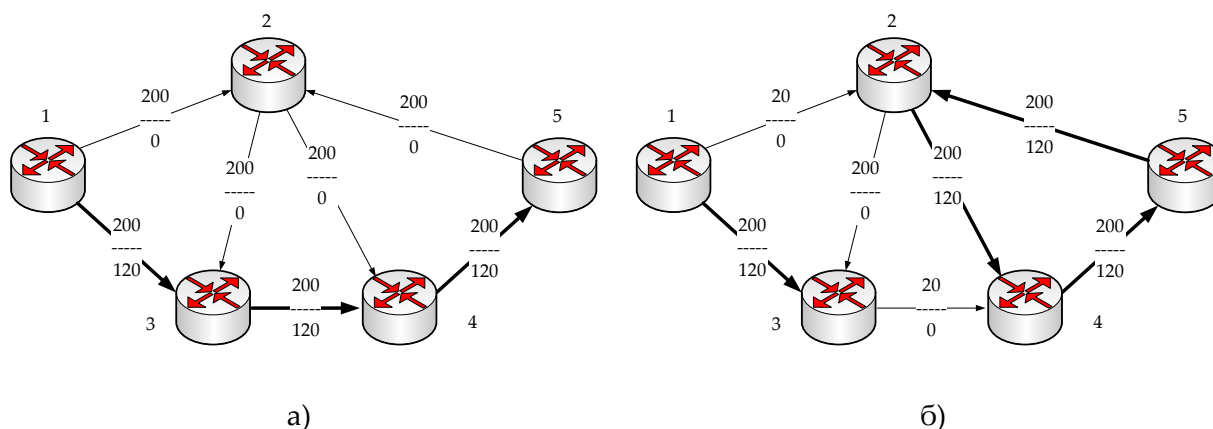


Рис. 2. Примеры решения задачи многоадресной маршрутизации при наличии контура в структуре сети

Наличие контура $v_2 \rightarrow v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow v_2$ в структуре моделируемой ТКС может неоднозначно сказаться на характере получаемых решений задач как многоадресной, так и широковещательной маршрутизации. В некоторых случаях (рис. 2 а) несоблюдение условий (6) может и не сказаться на корректности расчета искомых маршрутов. Однако при ином выборе пропускных способностей каналов связи (рис. 2 б) отсутствие учета условий (6) уже не обеспечит связности рассчитываемых многоадресных маршрутов, хотя все остальные условия (2)-(5) и (7) успешно выполняются. В данном случае (рис. 2 б) при соблюдении условий (6) задача не имеет решений, т.к. между первым и четвертым, а также первым и пятым маршрутизаторами отсутствует маршрут с пропускной способностью не меньше 120 1/с.

Примеры решения задачи широковещательной маршрутизации представлены на рис. 3. На рис. 3 а представлено решение задачи широковещательной маршрутизации, когда в качестве критерия оптимальности выступал минимум числа переприемов, что обеспечивалось соответствующим выбором маршрутной метрики ($f_{(i,j)}^k = 1$). В рамках модели (2)-(4), (6)-(9) производится адаптация решений при изменении пропускных способностей каналов связи. Так, если пропускная способность канала связи (1, 3) уменьшилась от 200 до 20 1/с, то изменился и результирующий характер решений (рис. 3 б).

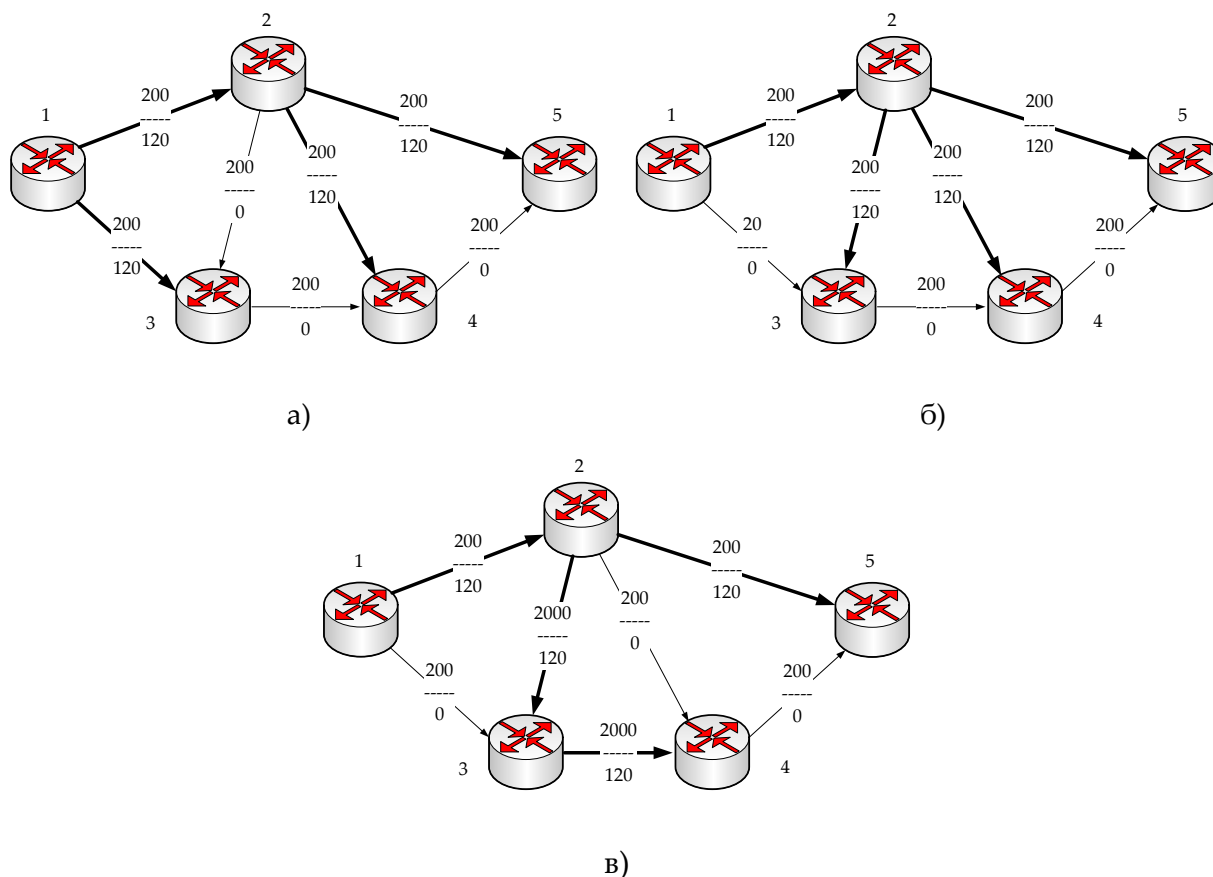


Рис. 3. Примеры решения задачи широковещательной маршрутизации

При использовании метрики, аналогичной протоколу IGRP ($f_{(i,j)}^k = 10^7 / \varphi_{(i,j)}$), результат решения задачи широковещательной маршрутизации также изменился (рис. 3 в). Нарастивание пропускной способности каналов (2, 3) и (3, 4) с 200 до 2000 1/с привело к включению их в результирующие маршруты, т.к. подобная метрика всегда ориентирует на выбор каналов с максимальной пропускной способностью [9].

При анализе двухпродуктового случая (при обслуживании одновременно двух трафиков) на структуре сети в разрывах ее дуг указывались (сверху вниз): пропускная способность канала, интенсивность первого трафика и интенсивность второго трафика (1/с). Пусть при многоадресной маршрутизации необходимо рассчитать два типа путей:

для первого трафика, протекающего с интенсивностью 120 1/с, – от первого к третьему, четвертому и пятому узлам;

для второго трафика, протекающего с интенсивностью 150 1/с, – от первого ко второму и четвертому узлам.

На рис. 4 а представлено решение задачи многоадресной маршрутизации, когда в качестве критерия оптимальности выступал минимум числа переприемов ($f_{(i,j)}^k = 1$). Тогда для первого трафика искомый путь пролегал через первый, третий, четвертый и пятый маршрутизаторы, а для второго трафика – через первый, второй и четвертый маршрутизаторы. Каждый из путей имел пропускную способность 200 1/с.

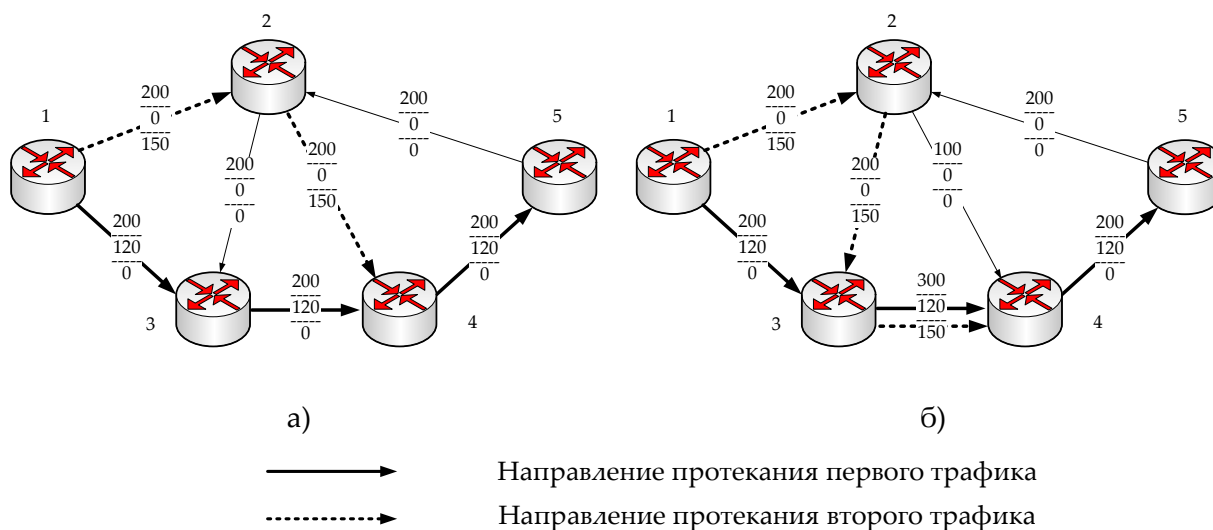


Рис. 4. Примеры решения задачи многоадресной маршрутизации для двухпродуктового случая

При изменении пропускных способностей каналов (2, 4) и (3, 4) характер решения несколько изменился (рис. 4 б): рассчитанные пути для передачи пакетов первого и второго трафиков начали пересекаться – канал (3, 4) стал использоваться обоими трафиками, т.к. его пропускной способности (300 1/с) достаточно для обслуживания агрегированного трафика с суммарной интенсивностью 270 1/с.

Выводы

В данной статье предложены потоковые модели многоадресной и широковещательной маршрутизации в телекоммуникационных сетях. Новизна моделей состоит в описании многопродуктового случая, а также в учете потокового (мультипотокового) характера современного сетевого трафика, что позволило и для случая многоадресной и широковещательной маршрутизации ввести ранее известные [9] условия предотвращения перегрузки каналов связи (7). Модели представлены системой линейных (что немаловажно) уравнений и неравенств, что делает их применение достаточно эффективным с точки зрения вычислительной реализации. В рам-

ках предложенных моделей задачи многоадресной и широковещательной маршрутизации сведены к решению оптимизационных задач булевого программирования (2), (8). Поточковая модель широковещательной маршрутизации отличается от модели многоадресной маршрутизации отказом от условий (5), а также расширением области использования условия (9) по сравнению с условием (1).

На примерах показана работоспособность предложенных моделей с точки зрения обслуживания одновременно нескольких трафиков с разными характеристиками, а также возможность адаптации получаемых решений к изменению параметров сети (пропускных способностей каналов связи). Предложенные модели могут использоваться как непосредственно при решении задач многоадресной и широковещательной маршрутизации, так и при математическом описании более сложных процессов и проблем, например связанных с проектированием ТКС, где задачи маршрутизации дополняют другие не менее важные сетевые задачи (выбор топологии и пропускных способностей каналов связи) [8].

Список литературы:

1. *Остерлох Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – С.Пб.: BHV-С.Пб., 2002. – 512 с.
2. *Medhi D., Ramasamy K.* Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann, 2007. – 788 p.
3. *Carlos A.S. Oliveira, Panos M. Pardalos.* A survey of combinatorial optimization problems in multicast routing // Computers and Operations Research. – Vol. 32, Issue 8. – 2005. – P. 1953-1981.
4. *Pragyansmita P., Raghavan S. V.* Survey of Multicast Routing Algorithms and Protocols // Proceedings of the Fifteenth International Conference on Computer Communication (ICCC 2002). – 2002. – P. 902-926.
5. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications. – 1975. – Vol. 25. №1. – P. 85-95.
6. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 3 – 41. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_popovsky_functional.pdf.
7. *Лемешко А.В.* Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Ю.Н. Добрышкин, О.А. Дробот // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2 (2). – С. 33 – 41. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_results.pdf.
8. *Лемешко А.В., Стерин В.Л.* Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 8 – 17. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf.
9. *Лемешко О.В., Дробот О.А., Симоненко Д.В.* Результаты порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Вип. 1(13), 2007. – С. 66-69.