



УДК: 004.72 + 519.171

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

APPLYING GRAPH THEORY FOR REGIONAL DATA TRANSFERRING NETWORK ARCHITECTURE MODELING

С.Н. Девицына
S.N. Devitsyna

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85
Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: devitsyna@bsu.edu.ru

Аннотация. В статье показана возможность применения теории графов для решения задачи поиска кратчайшего маршрута между узлами региональной сети передачи данных. Представлена разработка сценария модернизации инфокоммуникационной инфраструктуры региональной сети передачи данных для повышения максимальных скоростей передачи по существующим транспортным магистралям, обеспечения качества сервиса и надежности.

Resume. The article shows the possibility of using graph theory to solve the problem of finding the shortest route between the nodes of the regional data network. Presented scenario development modernization of info-communication infrastructure of regional data transmission network to increase the maximum transmission rate of the existing transport routes, ensure quality of service and reliability.

Ключевые слова: архитектура сети, теория графов, инфокоммуникационные технологии
Keywords: network architecture, graph theory, information and communication technology

Актуальность темы обусловлена тем, что в настоящее время на рынке услуг широкополосного доступа наблюдается стремительный рост объемов передачи интернет-трафика в сетях Операторов связи. Этому способствует рост популярности видео-, мобильных и облачных сервисов, а также увеличение скорости передачи информации и расширение пользовательской базы, охваченной широкополосными услугами. Данный факт приводит к постоянной потребности в увеличении полосы пропускания существующих сетей передачи данных (СПД) с целью поддержания высокого уровня качества предоставляемых услуг.

Важной проблемой является неравномерная загрузка сетевых узлов региональных сетей передачи данных. В результате сеть используется либо не эффективно, либо ее ресурс недостаточен для передачи требуемого объема трафика с гарантированным уровнем качества. Существующая сетевая инфраструктура региональных сетей реализована, как правило, на базе волоконно-оптических линий связи с топологией типа «кольцо». Она объединяет сетевые узлы с разными требованиями к пропускной способности, в связи с чем возникает необходимость проанализировать интенсивность информационных потоков и выявить «узкие места» - перегруженные, либо недогруженные участки сети. Вместе с тем, существующий ресурс межрайонных волоконно-оптических линий связи на многих направлениях практически исчерпан, что не позволяет увеличивать полосу пропускания региональной сети передачи данных простым увеличением количества каналов. Таким образом, требуется разработать комплекс мероприятий по оптимизации как сетевой, так и транспортной инфраструктуры.

Существующие методы оптимизации сетевой инфраструктуры включают применение как новых современных решений – внедрение механизма MPLS (многопротокольная коммутация по меткам), так и проверенных временем способов реконструкции, например, применение технологии волнового уплотнения WDM, позволяющей использовать существующую кабельную инфраструктуру. Эти решения позволяют изменить архитектуру региональных сетей передачи данных, увеличить пропускную способность их сегментов и разгрузить крупные узлы.

Цель работы состоит в разработке сценария модернизации инфокоммуникационной инфраструктуры региональной сети передачи данных для повышения максимальных скоростей передачи по существующим транспортным магистралям, обеспечения качества сервиса и надежности.

Состояние проблемы и задачи исследования. Аналитическому моделированию инфокоммуникационных сетей посвящен ряд работ В.М. Вишневого [1], А.Н. Дудина [2], Г.П. Башарина [3], А.А. Сысоева [4] и многих других авторов [7,8]. В большинстве работ содержатся обобщенные модели сетей, даны общие рекомендации по организации сетевой инфраструктуры. Вместе с тем, в настоящее время известно мало работ, посвященных исследованию широкополосных оптических транспортных сетей, принимающих во внимание особенности концепции сетей связи следующего поколения NGN.



Основным недостатком известных работ по рассматриваемой проблеме является отсутствие целостной концепции, охватывающей широкий круг вопросов разработки научно-технических основ создания широкополосных СПД, разработки методов исследования, моделирования и проектирования структурно-сетевых решений и сетевых устройств, включающего анализ пропускной способности, надежности и разработку путей улучшения этих показателей, а также вопросы синтеза структур и топологий сегментов оптической сети передачи данных, обладающих наилучшими технико-экономическими и эксплуатационными характеристиками.

Постановка задачи. Для оценки эффективности возможных вариантов схем реконструкции, необходимо:

- определить количество дополнительных каналов, организуемых между узлами LSR (коммутирующих метки маршрутизаторов в MPLS сети);
- определить количество новых узлов WDM (систем волнового уплотнения);
- определить средний коэффициент использования пропускной способности каналов связи;
- определить значение длины кратчайшего пути от центрального узла LSR до самого дальнего узла с учетом выполнения требования по ограничению суммарного потока между этими узлами величиной максимальной пропускной способности каналов, входящих в этот маршрут.

Основываясь на результате статистического анализа данных нагрузки сетевых узлов, зададим величину входящего и исходящего информационного потока для каждого узла сети с учетом всплеска с максимальным значением. Полученные значения запишем в таблицу, где $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множество исходящих узлов, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ – множество входящих узлов, m, n – существующие IP/MPLS узлы, значение $a_m b_n$ – заданная величина информационного потока между узлами a_m и b_n , измеряемая в Гб/с.

При этом примем, что весь информационный поток, исходящий из узла a_i , сходится в узлах b_n , где $n \neq 1$, а весь поток, исходящий из узлов a_m , где $m \neq 1$, сходится в узле b_1 . Такое допущение возможно, если учитывать, что количество данных исходящих из узла a_m , конечным адресом которых является узел b_n , при $m \neq 1$ и $n \neq 1$, значительно меньше, чем между $a_1 b_n$ и $a_m b_1$.

Таким образом, значение $a_m b_n = 0$, при $m \neq 1$ и $n \neq 1$.

Таблица
Table

Исходные данные максимального значения информационного потока между узлами IP/MPLS сети
Initial data maximum value of the flow of information between the nodes of IP/MPLS network

A_m / B_n	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
a_1	0	1	6	1	1	1	4	1	4	3,5	1	1,5
a_2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_3	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_5	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_7	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_8	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_9	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_{10}	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_{11}	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_{12}	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Максимальные значения информационного потока между узлами IP/MPLS сети, представленные в таблице, получены на основании анализа статистических данных нагрузки реальной региональной сети передачи данных, приведенных в магистерской диссертации Крамаровского Р., выполненной на кафедре Информационно-телекоммуникационных систем и технологий НИУ «БелГУ».

Моделирование архитектуры сети. Для решения поставленных задач удобно использовать математическую модель сети, представленную в виде неориентированного графа $G(V, E)$ [4, 5], включающего в себя множество вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$, которые соответствуют узлам LSR, и множе-



ство ребер $E = \{u, v | u \in V, v \in V\}$, описывающих существующие физические связи между соседними узлами LSR. Для упрощения расчетов примем, что каждое ребро между смежными ему вершинами отображает все физические связи, имеющиеся между соответствующим этим вершинам узлам LSR.

Пусть первый вариант реконструкции предполагает установку семи узлов WDM на участках, где отсутствует свободный физический ресурс ВОЛС. Архитектура сети MPLS остается неизменной, все магистральные каналы становятся равны между собой.

Первому варианту будет соответствовать граф $G_1(V, E)$, заданный соответствующей матрицей смежности и матрицей весов:

$$S[i, j] = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } v_i \text{ смежна с вершиной } v_j; \\ 0, & \text{если вершина } v_i \text{ не смежна с вершиной } v_j; \\ \infty, & \text{если } i = j; \end{cases}$$

$$W[i, j] = \begin{cases} c_{ij}, & \text{если существует ребро } e_{ij}; \\ \infty, & \text{если не существует ребро } e_{ij}; \\ \infty, & \text{если } i = j; \end{cases}$$

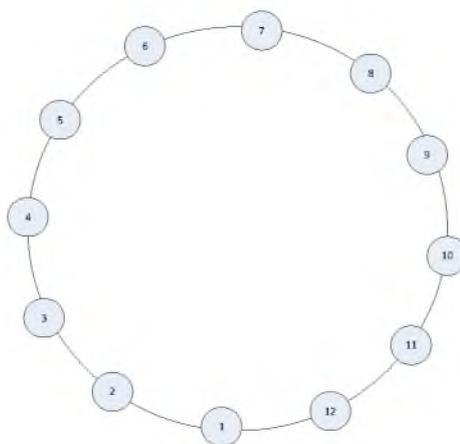


Рис. 1. Расчетная модель сети в виде графа для первого варианта реконструкции
 Fig. 1. Estimated network model as a graph for the first embodiment renovation

$$S = \begin{pmatrix} \infty & 1 & \infty & 1 \\ 1 & \infty & 1 & \infty \\ \infty & 1 & \infty & 1 & \infty \\ \infty & \infty & 1 & \infty & 1 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 1 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 1 & \infty & 1 & \infty & \infty \\ \infty & 1 & \infty & 1 & \infty \\ 1 & \infty & 1 & \infty \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} \infty & 20 & \infty & 20 \\ 20 & \infty & 20 & \infty \\ \infty & 20 & \infty & 20 & \infty \\ \infty & \infty & 20 & \infty & 20 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 20 & \infty & 20 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 20 & \infty & 20 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 20 & \infty & 20 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 20 & \infty & 20 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 20 & \infty & 20 & \infty & \infty \\ \infty & 20 & \infty & 20 & \infty \\ 20 & \infty & 20 & \infty \end{pmatrix}$$

Значение w_{ij} задает максимальную пропускную способность канала связи между узлом v_i и узлом v_j .

Граф $G_1(V, E)$ является связным со степенью связности $k = 2$. Это означает, что между любыми двумя вершинами графа существуют два разных пути.

Используя математический аппарат теории графов, найдем минимальное количество ребер, образующим путь между вершинами v_1 и v_j . Результат отобразим в виде матрицы-строки:



$$D[j] = \begin{cases} d, \text{ где } d = \min \sum e_{uv} | e_{uv} \in E; \\ 0, \text{ если } j = 1; \end{cases}$$

$$D = (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1);$$

Обозначим $f_{ucx.n}$ – величину исходящего информационного потока из узла v_1 в узел $v_n | n \neq 1$, а $f_{ax.j}$ – величину входящего информационного потока в узел v_1 из узла $v_n | n \neq 1$. Значение этих величин известно из таблицы.

Используя известный алгоритм поиска кратчайших путей (алгоритм Дейкстры), поочередно проложим кратчайший маршрут из вершины v_1 до вершины v_j , для каждой из которых выполняется текущее условие $D(j) \rightarrow \min$. Далее определим все ребра (участки), входящие в каждый текущий маршрут. По каждому из этих ребер может передаваться информационный поток $f_{ucx.n}$ или $f_{ax.j}$.

Тогда, любому ребру $e_{uv} \in E$ будет соответствовать величина w_{ij}^* , отражающая суммарный исходящий поток данных, идущий от вершины v_1 к некоторому множеству N вершин v_n и суммарный входящий поток к вершине v_1 от некоторого множества M вершин v_m , в состав кратчайшего пути до которых входит ребро e_{uv} .

$$w_{ij}^* = \sum_N f_{ucx.n} + \sum_M f_{ax.m} | n \in N; m \in M;$$

При этом должно выполняться условие:

$$w_{ij}^* \leq w_{ij};$$

Т.е. суммарный поток не должен превышать максимального значения пропускной способности суммарного канала.

В случаях когда $w_{ij}^* > w_{ij}$, необходимо определить альтернативный маршрут к текущему узлу и в соответствии с этим маршрутом пересчитать значение $D(j)$ для этого узла и вычислить значение w_{ij}^* .

Результат вычислений отобразим в виде матрицы W^* :

$$W^* = \begin{pmatrix} \infty & 14 & \infty & 11 \\ 2,8 & \infty & 13 & \infty \\ \infty & 2,6 & \infty & 7 & \infty \\ \infty & \infty & 1,4 & \infty & 6 & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 1,2 & \infty & 5 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 4 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0,8 & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & 0,2 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & 1 & \infty & 1 & \infty & \infty \\ \infty & 5 & \infty & 1,7 & \infty \\ \infty & 8,5 & \infty & 1,9 \\ 2,2 & \infty & 9,5 & \infty \end{pmatrix}$$

Средний коэффициент эффективности использования полосы пропускания каналов связи определим по формуле:

$$k_{эф.ср.} = \frac{\sum_n^N k_{эф.n}}{N},$$

где $k_{эф.n} = \frac{w_n^*}{w_n}$ – коэффициент эффективности использования n-го канала связи; N – суммарное количество дуплексных каналов связи.

$$k_{эф.ср.} = 0,42;$$

$k_{эф.ср.нов.} = 0,35$ – средний коэффициент эффективности использования полосы пропускания только новых каналов.



Количество новых монтируемых каналов: $N_{\text{МОНТ}} = 6$;

Количество узлов WDM: $N_{\text{wdm}} = 7$;

Максимальное значение пути: $d_{\text{max}} = D(7) = 6$.

Рассмотрим следующий вариант реконструкции сети с использованием двух дополнительных каналов в виде хорд окружности (кольцевой топологии), между центральным узлом и двумя крупными сетевыми узлами с высокой степенью загрузки.

Граф $G_2(V, E)$ (см. рис. 2), заданный соответствующей матрицей смежности S и матрицей весов W , описывает реализацию схемы второго варианта.

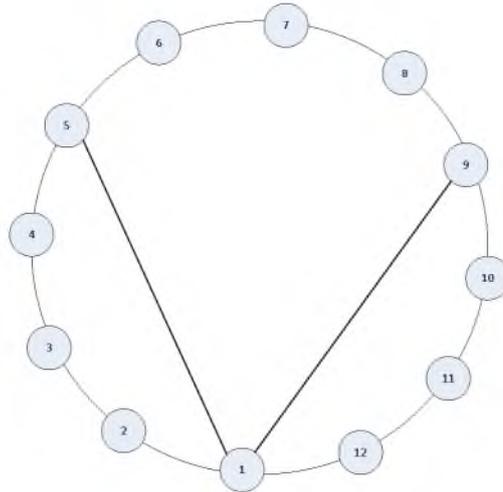


Рис. 2. Расчетная модель сети в виде графа для второго варианта реконструкции с двумя дополнительными каналами между узлами 1 - 5 и 1 - 9

Fig. 2. Estimated network model as a graph for the second variant of reconstruction with two additional channels between nodes 1 - 5 and 1 - 9

$$S = \begin{pmatrix} \infty & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \infty \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} \infty & 20 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 10 \\ 20 & \infty & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & \infty & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & \infty & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 20 & \infty & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & \infty & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & \infty & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & \infty & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & \infty & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & \infty & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & \infty & 10 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & \infty \end{pmatrix}$$

Граф $G_2(V, E)$ является связным со степенью связности $k = 4$, т.е. между любыми двумя вершинами графа существуют четыре разных пути.

Кратчайшее расстояние между вершинами v_i и v_j :

$$D = (0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1) ;$$

Результат вычислений:



$$W^* = \begin{pmatrix} \infty & 7 & \infty & \infty & 7 & \infty & \infty & \infty & 8,5 & \infty & \infty & 2,5 \\ 1,4 & \infty & 6 & \infty \\ \infty & 1,2 & \infty & 0 & \infty \\ \infty & \infty & 0 & \infty & 0,2 & \infty \\ 1,4 & \infty & \infty & 1 & \infty & 5 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 4 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0,8 & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & 0,2 & \infty & \infty & \infty \\ 1,7 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & 3,5 & \infty & \infty \\ \infty & 0,7 & \infty & 0 & \infty \\ \infty & 0 & \infty & 0,2 \\ 0,5 & \infty & 1 & \infty \end{pmatrix}$$

Средний коэффициент эффективности использования полосы пропускания каналов связи:

$$k_{эф.ср.} = 0,3;$$

Средний коэффициент эффективности использования полосы пропускания только новых каналов

$$k_{эф.ср.нов.} = 0,93;$$

Количество новых монтируемых каналов: $N_{МОНТ.} = 2$;

Количество узлов WDM: $N_{wdm} = 8$;

Максимальное значение пути: $d_{max} = D(7) = 3$.

По аналогичной методике вычисляются значения коэффициентов эффективности использования полосы пропускания каналов связи и полосы пропускания новых каналов для всех возможных вариантов реконструкции на основе изменения топологии сети и введения WDM-каналов.

Таким образом, возможна реализация различных моделей на основе теории графов, описывающих каждый из вариантов реконструкции. Каждый вариант содержит конкретное количество новых каналов и новых узлов WDM. При помощи моделирования, используя известные алгоритмы, получены данные по распределению нагрузки на каналах и определены коэффициенты их использования по полосе пропускания, а также рассчитаны кратчайшие маршруты между узлами. Кроме того, выработан комплекс критериев для оценки эффективности того или иного варианта реконструкции с учетом конкретных условий функционирования региональной сети.

Заключение. Для выбора сценария модернизации региональной сети передачи данных, на базе теории графов была разработана имитационная модель, позволяющая проанализировать распределение информационных потоков в сетях передачи данных с различной архитектурой.

Предложенные в работе способы оценки эффективности различных схем оптимизации пакетных сетей позволяют на начальном этапе, не прибегая к более сложным исследованиям, более точно и конкретно подготовить технические требования для строительства оптической транспортной сети, оценить затраты на реализацию того или иного решения. Особенностью данной модели является то, что при формировании исходных данных необходимо использовать статистические данные о нагрузке в сетевых узлах реальной сети передачи данных.

Список литературы References

1. Вишнеvский В.М. Оптимизация топологии сетей передачи информации большой размерности // А. О. Леонов, Н. Н. Левченко, А. М. Степанов / Автоматика и телемеханика, № 5. – 2007. – С. 18-31.
Vishnevskij V.M. Optimizacija topologii setej peredachi informacii bol'shoj razmernosti // A. O. Leonov, N. N. Levchenko, A. M. Stepanov / Avtomatika i telemekhanika, № 5. – 2007. – S. 18-31.
2. Дудин А.Н. Модель сети обслуживания с параллельными маршрутами // М.Х. Ли, Ч.Х. Чое / Автоматика и телемеханика, № 6. – 2007. – С. 134-149.
Dudin A.N. Model' seti obsluzhivanija s parallel'nymi marshrutami // M.H. Li, Ch.H. Choe / Avtomatika i telemekhanika, № 6. – 2007. – S. 134-149.
3. Башарин Г.П. Математическая модель адаптивной многоскоростной системы с эластичным трафиком // Г.П. Башарин, С.Н. Клапоушак, Н.В. Митькина / Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика», № 3. - М.: РУДН. - 2008 - С.58-66.
Basharin G.P. Matematicheskaja model' adaptivnoj mnogoskorostnoj sistemy s jelastichnym trafikom // G.P. Basharin, S.N. Klapoushchak, N.V. Mit'kina / Vestnik RUDN. Serija «Matematika. Informatika. Fizika», № 3. - М.: RUDN. - 2008 - S.58-66.



4. Сысоев А.А. 2003. Модели и методы совместной модернизации региональных сетей связи и систем их технической эксплуатации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 20 с.
Sysoev A.A. 2003. Modeli i metody sovmestnoj modernizacii regional'nyh setej svjazi i sistem ih tehniceskoi jekspluatacii. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Sankt-Peterburg, 20 s.
5. Агеев Д.В. Структурный и параметрический синтез наложенной сети IP/MPLS поверх сети WDM с применением модели, представленной в виде многослойного графа // Проблемы телекоммуникаций, №3 – 2012. – С. 56-63.
Ageev D.V. Strukturnyj i parametriceskij sintez nalozhennoj seti IP/MPLS poverh seti WDM s primeneniem modeli, predstavlennoj v vide mnogoslajnogo grafa // Problemy telekommunikacij, №3 – 2012. – S. 56-63.
6. Никульский И.Е. 2011. Модели и методы построения широкополосных оптических сетей доступа. Автореф. дис. ... доктора техн. наук. Санкт-Петербург, 35 с.
Nikul'skij I.E. 2011. Modeli i metody postroenija širokopolosnyh opticeskih setej dostupa. Avtoref. dis. ... doktora tehn. nauk. Sankt-Peterburg, 35 s.
7. Константинов И.С., Польщиков К.А., Лазарев С.А. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения // Научные ведомости БелГУ. Серия Экономика. Информатика. Выпуск 35/1, №13 (210). – 2015. – С. 156-162
Konstantinov I.S., Pol'shhikov K.A., Lazarev S.A. Imitacionnaja model' peredachi informacionnyh potokov v mobil'noj radioseti special'nogo naznachenija // Nauchnye vedomosti BelGU, Serija Jekonomika. Informatika Vypusk 35/1, №13 (210). – 2015. – S. 156-162
8. Буторин В.М., Полянский А.В., Павлова Е.В. Применение алгоритма фиксированной маршрутизации для минимизации среднего времени задержки в сети // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. Выпуск 25/1, №1 (144). – 2013. – С. 164-171.
Butorin V.M., Poljanskij A.V., Pavlova E.V. Primenenie algoritma fiksirovannoj marshrutizacii dlja minimizacii srednego vremeni zaderzhki v seti // Nauchnye vedomosti BelGU, Serija: Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. Vypusk 25/1, №1 (144). – 2013. – S. 164-171.