

УДК 621.391

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ДИАКОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА МЕЖДОМЕННОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С БАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#), [А.Е. ИЛЬЯШЕНКО](#), [Т.Н. КОВАЛЕНКО](#), [Е.С. НЕВЗОРОВА](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – In this paper, the diacoptycal method of inter-area routing with load balancing in a telecommunication network was proposed. The method allows to increase the scalability of routing solutions in comparison with the centralized approach without reducing the efficiency of the network, estimated by the maximum value of link load threshold. The method involves the decomposition of the general routing problem in a multi-area network into several routing subtasks of smaller size that can be solved for each individual area followed by combining the solutions obtained for the whole telecommunication network. The foundation of the method is a flow-based routing model based on the implementation of the concept of Traffic Engineering and focused on minimizing the maximum value of link load threshold. The results of the analysis confirmed the operability of the method on a variety of numerical examples and demonstrated the full correspondence of the efficiency of the obtained diacoptycal routing solutions to the centralized approach. The advantage of the proposed method is also the absence of the need to coordinate routing solutions received on subnetworks, which positively affects both the time of solving the set task and the amount of service traffic circulated in the network associated with the transfer of data on the state of network areas and coordinating information.

**Анотація** – Запропоновано діакоптичний метод ієрархічної маршрутизації в мультидоменній телекомунікаційній мережі на основі потокової моделі маршрутизації з урахуванням концепції Traffic Engineering. Пропонований метод дозволяє мінімізувати порогове значення максимальної завантаженості каналів зв'язку мережі, вирішуючи при цьому проблему масштабованості існуючих методів маршрутизації. На ряді мережних прикладів проведено аналіз запропонованого метода та показано його ефективність у порівнянні з відомим централізованим підходом.

**Аннотация** – Предложен диакоптический метод иерархической маршрутизации в мультидоменной телекоммуникационной сети на основе потоковой модели маршрутизации с учетом концепции Traffic Engineering. Предлагаемый метод позволяет минимизировать пороговое значение максимальной загрузки каналов связи сети, решая при этом проблему масштабируемости существующих методов маршрутизации. На ряде сетевых примеров проведен анализ предлагаемого метода и показана его эффективность по сравнению с известным централизованным подходом.

## Введение

Современные телекоммуникационные сети (ТКС) характеризуются постоянным ростом территориальной распределенности, числа коммутационных и терминальных устройств, расширением количества предоставляемых сервисов, что значительно усложняет их структуру и алгоритмы функционирования, требуя новых подходов при разработке моделей и методов их анализа и синтеза. Поэтому одной из основных проблем, возникающих при управлении трафиком в целом и маршрутизации в частности, является проблема масштабируемости предлагаемых решений по обеспечению требуемого уровня качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [1, 2]. В этой связи для большинства поддерживаемых технологических решений и современных протоколов маршрутизации, применяемых в транспортных технологиях IP (Internet Protocol), ATM (Asynchronous Transfer Mode) и MPLS (Multiprotocol Label Switching),

характерен декомпозиционный, иерархический подход [3-5], направленный на снижение размеров маршрутных таблиц, объемов циркулирующего в сети служебного трафика, а также времени решения задач маршрутизации. При этом эффективность протокольного решения задач иерархической маршрутизации во многом определяется уровнем адекватности используемых при этом математических моделей и методов, в рамках которых важно обеспечить учет мультидоменного и иерархического характера построения современных ТКС. Таким образом, повышение масштабируемости решений в области маршрутизации на основе усовершенствования соответствующих математических моделей и методов является одной из актуальных задач в современных телекоммуникационных сетях.

## **I. Обзор известных решений в области иерархической маршрутизации**

В результате анализа математических моделей маршрутизации установлено, что существует два их основных типа: графовые и потоковые модели [6-12]. В рамках графовых моделей учитываются, прежде всего, особенности структурного построения моделируемой ТКС, а сама задача маршрутизации сводится к поиску кратчайшего пути на графе – для однопутевой маршрутизации или поиску оптимального мультипути – при многопутевой маршрутизации [6-8]. В основу современных протоколов маршрутизации положены именно графовые модели, в которых для расчета путей используется алгоритм Дейкстры, применяемый, например, в протоколах OSPF, IS-IS, PNNI, и Беллмана-Форда, используемый, например, в протоколах RIP, IGRP и BGP. В потоковых же моделях [9-12] основное внимание уделяется описанию функциональных свойств моделируемого процесса и наряду со структурой сети в большей мере учитываются параметры каналов связи и передаваемого трафика. Так как современный сетевой трафик является преимущественно мультимедийным и имеет потоковый характер, то использование именно потоковых моделей позволяет получать наиболее эффективные решения задач маршрутизации.

Кроме того, как показал проведенный анализ [10-22], к настоящему моменту времени известны и активно применяются потоковые модели многопутевой маршрутизации, построенные на основе использования сетей массового обслуживания, алгебраических, интегрально-дифференциальных и разностных уравнений состояния ТКС, тензорного представления и др. Однако по мнению многих ученых, работающих в области сетевых технологий, компромиссным вариантом, сочетающим адекватность описания и приемлемую сложность расчетов, является маршрутное решение с балансировкой нагрузки по принципам технологии Traffic Engineering (TE), предложенное в работах [20-22]. К сожалению, данное решение ориентировано на централизованный расчет маршрутов, представляя собой больше теоретический интерес, чем прикладную ценность. Поэтому в данной статье предложенное в работах [20-22] решение будет адаптировано под реализацию иерархической маршрутизации в мультидоменной телекоммуникационной сети.

## II. Модель маршрутизации с балансировкой нагрузки на основе концепции Traffic Engineering

В рамках предложенной в работах [20-22] ТЕ-модели структура ТКС описывается с помощью ориентированного графа  $G = (R, E)$ , где  $R$  – это множество вершин графа, которые моделируют маршрутизаторы сети, а  $E$  – множество ребер графа, моделирующих каналы связи. Для каждого канала связи  $E_{i,j} \in E$  известна его пропускная способность  $c_{i,j}$ . Обозначим через  $K$  множество потоков, циркулирующих в сети, тогда  $|K| = \tilde{K}$  – мощность множества  $K$ , количественно характеризующая общее число потоков в ТКС. Для каждого  $k$ -го потока ( $k \in K$ ) считаются известными  $s_k$  и  $t_k$  – узлы источник и получатель соответственно, а также его средняя интенсивность (скорость передачи) пакетов –  $\lambda^k$ , измеряемая в пакетах в секунду (1/с).

Условимся, что величина  $x_{i,j}^k$  представляет собой маршрутную переменную, которая характеризует часть  $k$ -го потока, протекающего в канале связи  $E_{i,j} \in E$ . Пусть также величина  $\alpha$  определяет динамически управляемый порог максимальной загрузки каналов ТКС. Тогда задача маршрутизации с поддержкой технологии Traffic Engineering может быть сформулирована в виде задачи линейного программирования по минимизации порога  $\alpha$

$$\min_x \alpha \quad (1)$$

при наличии следующих ограничений:

$$\sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 0 \text{ при } k \in K, R_i \neq s_k, t_k; \quad (2)$$

$$\sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = 1 \text{ при } k \in K, R_i = s_k; \quad (3)$$

$$\sum_{E_{i,j} \in E} x_{i,j}^k - \sum_{E_{j,i} \in E} x_{j,i}^k = -1 \text{ при } k \in K, R_i = t_k; \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \lambda_k x_{i,j}^k \leq c_{i,j} \alpha; E_{i,j} \in E. \quad (5)$$

Ограничения (2)-(4) связаны с необходимостью выполнения условий сохранения потока, то есть отвечают за отсутствие потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом. В свою очередь, условия (5) отвечают за предотвращение перегрузки каналов сети. Кроме того, исходя из физического смысла переменных  $\alpha$  и  $x_{i,j}^k$ , на них накладываются дополнительные ограничения, связанные с реализацией многопутевой стратегии маршрутизации:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1, \quad (6)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (7)$$

Достоинством модели (1)-(7) является соответствие концепции Traffic Engineering при реализации многопутевой маршрутизации, причем порог (1) с ростом загрузки сети также растет линейно [23], что гарантирует отсутствие колебаний в численных значениях основных показателей качества обслуживания. Однако несмотря на ряд преимуществ описанной модели, ей присущи и ряд недостатков, некоторые из них были рассмотрены в работах [24-26]. Авторами статьи были предложены варианты минимизации недостатков описанной модели, связанных с неадекватностью ее применения в сетях с полудуплексными и/или дуплексными каналами связи, приводящей к заикливанию пакетов, а также существенным снижением качества балансировки для сетей с неоднородной топологией, когда связность узлов по сети была не постоянной, а варьировалась в некоторых пределах. В качестве еще одного существенного недостатка модели (1)-(7) необходимо отметить проблему ее масштабируемости. Увеличение числа узлов и/или каналов связи в рассматриваемой ТКС приведет к значительному росту числа переменных и ограничений в модели, что отражается на сложности и времени решения задачи маршрутизации и объемах результирующих маршрутных таблиц.

Эффективным направлением повышения масштабируемости сетевых решений является переход к иерархической (многоуровневой) маршрутизации, основанной на декомпозиционном представлении потоковой модели (1)-(7) с учетом мультидоменного характера современных ТКС. Принципы декомпозиции и иерархии широко применяются в наиболее распространенных на данный момент транспортных технологиях. Так, в технологии IP маршрутизация реализуется на основе разделения исходной сети на множество подсетей – автономных систем (Autonomous System, AS), в каждой из которых используется свой маршрутизирующий протокол внутреннего шлюза (Interior Gateway Protocol, IGP), а для маршрутизации между AS применяются протоколы внешнего шлюза (Exterior Gateway Protocol, EGP), например, протокол BGP (Border Gateway Protocol) [3-7]. При этом некоторые протоколы класса IGP, например, OSPF (Open Shortest Path First) и интегрированный IS-IS (Integrated IS-IS), предполагают дальнейшую декомпозицию AS на подсети, именуемые доменами или областями (Areas). В технологии ATM функции иерархической маршрутизации реализуются протоколом PNNI (Private Network-to-Network Interface), предполагающим разделение сети на множество кластеров узлов (peer group).

В работах [27-32] предложены решения задачи иерархической маршрутизации в мультидоменных ТКС на основе введения двухуровневой иерархии решений. При этом характер используемых в работах [27-32] критериев оптимальности в том или ином виде ориентирован на учет требований концепции Traffic Engineering. Как правило, на нижнем уровне осуществляется решение маршрутных задач в каждом из доменов, что заметно снижает размерность и сложность решаемой оптимизационной

задачи. Верхний уровень иерархии расчетов функционально реализуется на сервере маршрутов и отвечает за координацию распределенной работы отдельных сетевых доменов для обеспечения связности междоменных маршрутов с целью приближения эффективности решений распределённой маршрутизации к качеству централизованных расчетов. Отдельной проблемой при этом оставалось обеспечение быстрой сходимости решений к своим оптимальным значениям за минимальное число итераций координирующей процедуры, так как их число напрямую влияет и на время решения задач маршрутизации, и на объемы передаваемой в сети служебной информации.

В этой связи в данной работе предлагается диакоптический метод иерархической маршрутизации в мультидоменной ТКС, который основан на расчете порядка маршрутизации в каждом из доменов по частям с последующим их безитерационным объединением (обобщением) для сети в целом. При этом преимуществом получаемых маршрутных решений является то, что их эффективность с точки зрения критерия (1) полностью соответствует результатам, получаемым в ходе централизованной маршрутизации. Отсутствие необходимости в итерационной координации получаемых многоуровневых маршрутных решений положительно сказывается на оперативности решения задач маршрутизации в сети с мультидоменной архитектурой.

### III. Диакоптический метод иерархической маршрутизации с балансировкой нагрузки в мультидоменной ТКС

В рамках предлагаемого диакоптического метода иерархической маршрутизации предполагается разбиение общей оптимизационной задачи (1) на  $N$  подзадач (по числу доменов) меньшей размерности с последующим обобщенным синтезом решения задачи маршрутизации для сети в целом [33, 34]. При этом границы доменов, например, проходят по каналам связи, что соответствует принципам декомпозиции сети, заложенных в протокол IS-IS. Тогда пусть каждый отдельный  $p$ -й домен в ТКС описывается с помощью подграфа  $G^p = (R^p, E^p)$  графа  $G$ , где  $R^p = \{R_i^p; i = \overline{1, m_p}\}$  – множество маршрутизаторов  $p$ -го домена, а  $m_p$  – их общее число в домене;  $E^p = \{E_{i,j}^p; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j\}$  – это множество внутридоменных каналов, соединяющих маршрутизаторы внутри  $p$ -го домена. Для каждого внутридоменного канала связи  $p$ -го домена через  $c_{i,j}^p$  обозначим его пропускную способность, измеряемую в пакетах в секунду (1/с). Обозначим через  $E^{p,q} = \{E_{i,j}^{p,q}; i = \overline{1, m_p}, j = \overline{1, m_q}; p, q = \overline{1, N}, p \neq q\}$  множество каналов, соединяющих маршрутизаторы  $p$ -го и  $q$ -го доменов (междоменные каналы). Пропускные способности междоменных каналов связи между маршрутизаторами  $p$ -го и  $q$ -го доменов обозначим соответственно через  $c_{i,j}^{p,q}$ .

Для наглядности описание и исследование предлагаемого диакоптического метода иерархической маршрутизации рассмотрим на примере структуры сети, представленной на рис. 1. Данная сеть, состоящая из 13 маршрутизаторов и 19 каналов связи (КС), разбита на 4 сетевых домена, т.е.  $N = 4$ . Например, для подграфа первого сетевого домена  $G^1 = (R^1, E^1)$ , представленного на рис. 1, обозначим множество маршрутизаторов как  $R^1 = \{R_1^1, R_2^1, R_3^1\}$  ( $m_1 = 3$ ), а множество внутридоменных каналов, соединяющих маршрутизаторы внутри домена –  $E^1 = \{E_{1,2}^1, E_{1,3}^1, E_{2,3}^1\}$ . Множество междоменных каналов, соединяющих маршрутизаторы 1-го и 2-го домена –  $E^{1,2} = \{E_{2,1}^{1,2}, E_{3,2}^{1,2}\}$ . Пусть между первым маршрутизатором первого домена ( $R_1^1$ ) и третьим маршрутизатором четвертого домена ( $R_3^4$ ) необходимо передавать пакеты с интенсивностью  $\lambda$ , которая изменялась в пределах от 1 до 200 1/с.

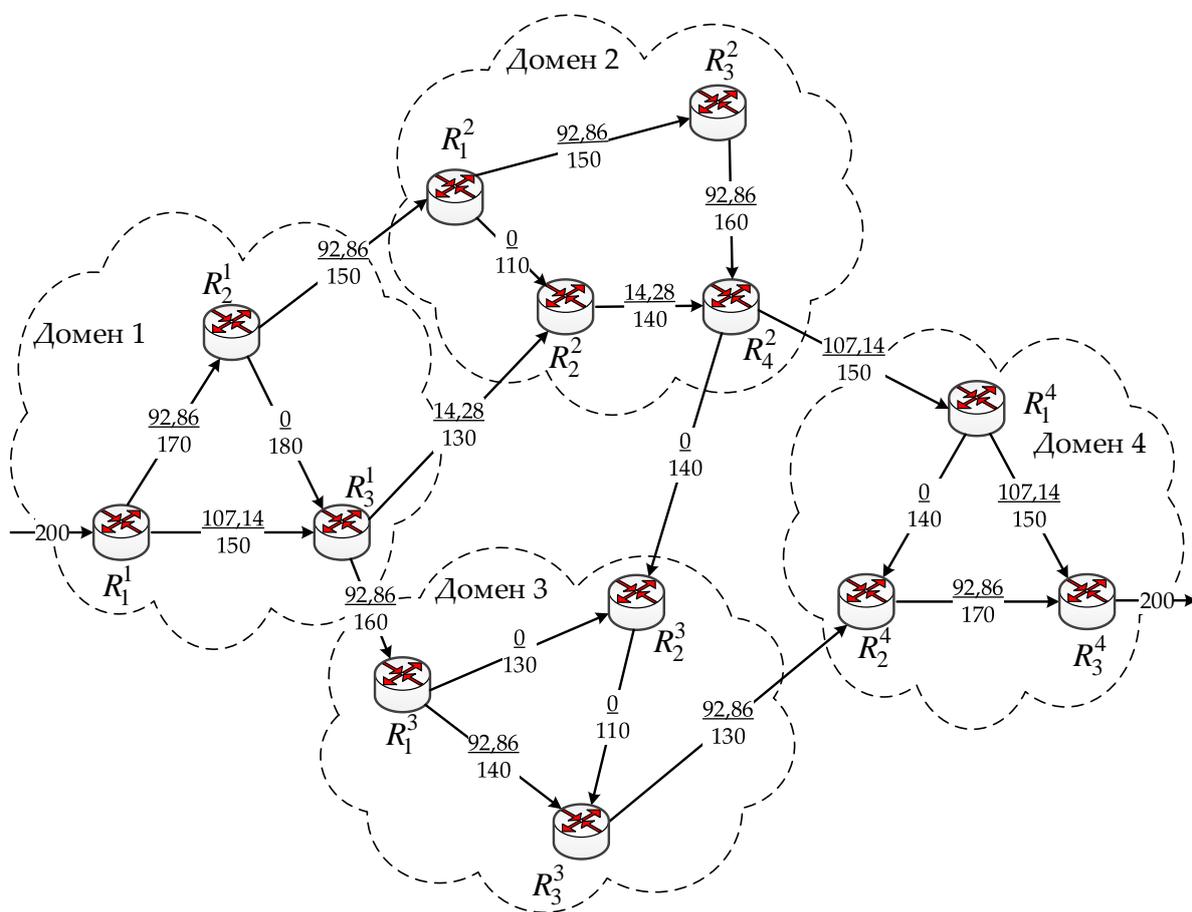


Рис. 1. Порядок централизованной маршрутизации в мультидоменной ТКС

С целью дальнейшего анализа эффективности получаемых решений с использованием модели (1)-(7) для рассматриваемого примера получен порядок централизованной маршрутизации потока при интенсивности  $\lambda = 200$  1/с (рис. 1). В разрывах ка-

налов связи указана дробь: в числителе приведена интенсивность потока, протекающая в данном канале, а в знаменателе – его пропускная способность (1/с). Для полученного решения (рис. 1) численное значение порога максимальной загрузки каналов ТКС (1) равно 0,7143.

Проведенные исследования показали, что при централизованном расчете маршрутных переменных (6) с увеличением интенсивности потока порог загрузки каналов сети  $\alpha$  (1) растет линейно (рис. 2). При этом, результаты централизованной ТЕМаршрутизации (рис. 2) выступали в дальнейшем в качестве эталонных при сравнении с результатами, получаемыми с помощью предлагаемого диакоптического метода маршрутизации.

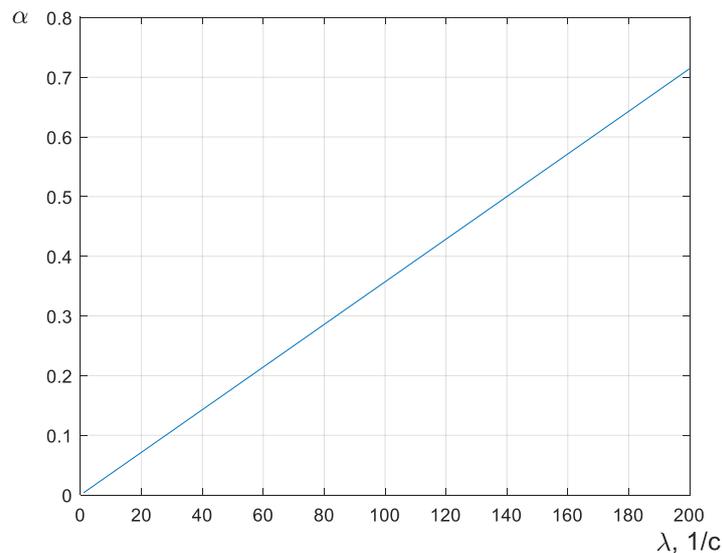


Рис. 2. Зависимость порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при централизованном решении задачи маршрутизации

На первом этапе предлагаемого метода необходимо определить обобщенные пропускные способности каждого домена данной ТКС. При этом каждый подграф  $G^p$ , описывающий структуру  $p$ -го домена, необходимо преобразовать в подграф  $G'^p$  следующим образом: значения пропускных способностей всех междоменных каналов, соединяющих маршрутизаторы данного домена с маршрутизаторами любого другого домена, необходимо принять равными бесконечности:

$$c_{i,j}^{p,q} = \infty, \quad \forall E_{i,j}^{p,q} \in E^{p,q}, E_{i,j}^{q,p} \in E^{q,p}, \quad q = \overline{1, N}, q \neq p. \quad (8)$$

Это осуществляется для того, чтобы на значения критерия (1), рассчитываемого в каждом отдельном  $p$ -м домене, не влияли коэффициенты использования междоменных каналов. Если количество входящих в  $p$ -й домен ( $E_{i,j}^{q,p}$ ) или исходящих ( $E_{i,j}^{p,q}$ ) междоменных каналов больше одного, в подграф  $G^p$  вводится эквивалентный (фиктивный) узел-исток  $R_s^p$  и/или фиктивный узел-сток  $R_t^p$ , принимая при этом:

$$R_i^p = R_s^p \forall E_{i,j}^{q,p} \in E^{q,p}, q = \overline{1, N}, q \neq p; \quad (9)$$

$$R_j^p = R_t^p \forall E_{i,j}^{p,q} \in E^{p,q}, q = \overline{1, N}, q \neq p. \quad (10)$$

Таким образом, вводимый подграф  $G^p = (R^p, E^p)$  содержит множество вершин  $R^p = R^p \cup \{R_s^p, R_t^p\}$  и дуг  $E^p = E^p \cup \{E_{s,j}^p, E_{i,t}^p\}$ .

Пример преобразования подграфа  $G^1$  в подграф  $G^1$  в соответствии с описанными процедурами представлен на рис. 3. Рассматриваемый подграф  $G^1$  имеет два исходящих междоменных канала, поэтому в него был введен эквивалентный (фиктивный) узел-сток  $R_t^1$ , при этом  $E_{2,t}^1 = E_{2,1}^1$ ,  $E_{3,t}^1 = E_{3,2}^1$ ,  $c_{2,t}^1 = c_{3,t}^1 = \infty$  в соответствии с описанными выше процедурами преобразования (8)-(10).

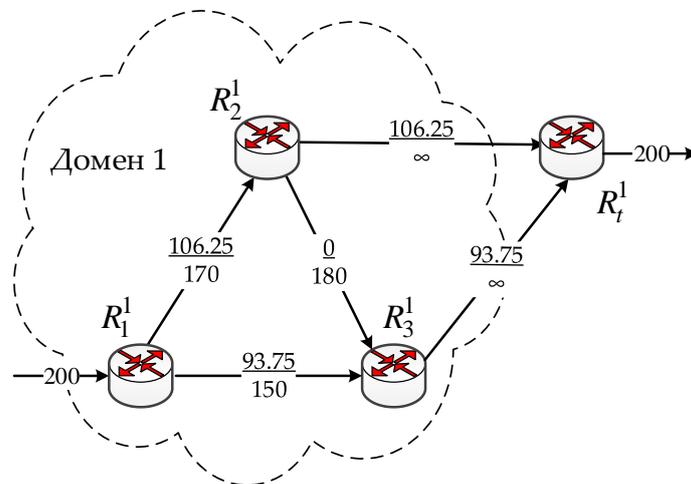


Рис. 3. Пример введения фиктивного узла-стока в первом домене с указанием порядка маршрутизации потока интенсивностью 200 1/с

Порядок преобразования подграфов второго, третьего и четвертого доменов рассматриваемой сети, а также результаты расчета их пропускной способности приведены на рис. 4 – рис. 6 соответственно. Подграф  $G^2$  второго домена имеет два исходящих и два входящих междоменных канала, в связи с этим в него были введены дополнительные фиктивные узел-источник  $R_s^2$  и узел-сток  $R_t^2$ , при этом в соответствии с правилами преобразования (8-10)  $E_{2,1}^{1,2} = E_{s,1}^{1,2}$ ,  $E_{3,2}^{1,2} = E_{s,2}^{1,2}$ ,  $E_{4,1}^{2,4} = E_{4,t}^{2,4}$ ,  $E_{4,2}^{2,3} = E_{4,t}^{2,3}$ ,  $c_{s,1}^{1,2} = c_{s,2}^{1,2} = c_{4,t}^{2,4} = c_{4,t}^{2,3} = \infty$  (рис. 4). Подграфы  $G^3$  и  $G^4$  третьего и четвертого доменов имеют по два входящих междоменных канала, в связи с чем в них были введены дополнительные фиктивные узлы-источники  $R_s^3$  и  $R_s^4$ , при этом в соответствии с правилами преобразования (8)-(10)  $E_{3,1}^{1,3} = E_{s,1}^{1,3}$ ,  $E_{4,2}^{2,3} = E_{s,2}^{2,3}$ ,  $E_{4,1}^{2,4} = E_{s,1}^{2,4}$ ,  $E_{3,2}^{3,4} = E_{s,2}^{3,4}$ ,  $c_{s,1}^{1,3} = c_{s,2}^{2,3} = \infty$ ,  $c_{s,1}^{2,4} = c_{s,2}^{3,4} = \infty$  (рис. 5, рис. 6).

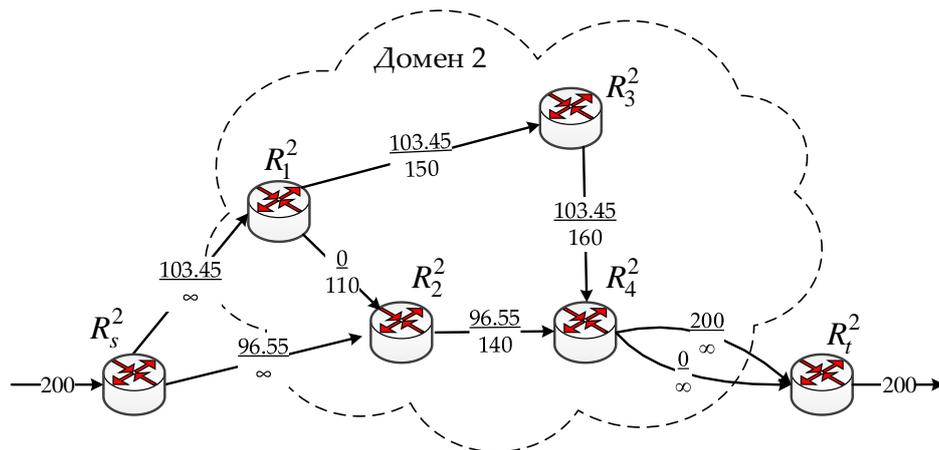


Рис. 4. Пример введения фиктивных узлов истока и стока во втором домене с указанием порядка маршрутизации потока интенсивностью 200 1/с

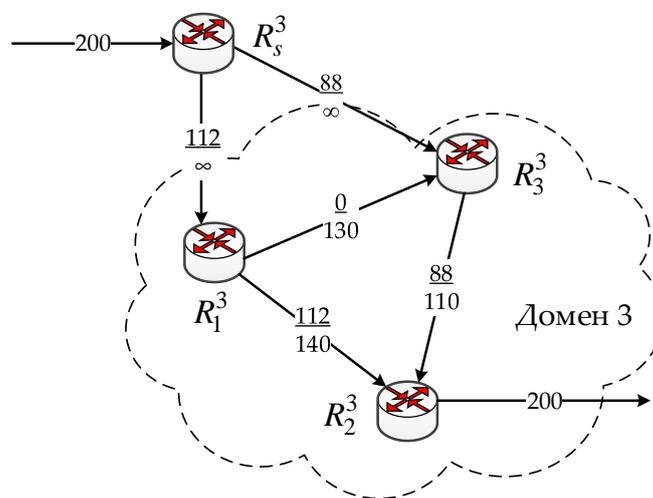


Рис. 5. Пример введения фиктивного узла-истока в третьем домене с указанием порядка маршрутизации потока интенсивностью 200 1/с

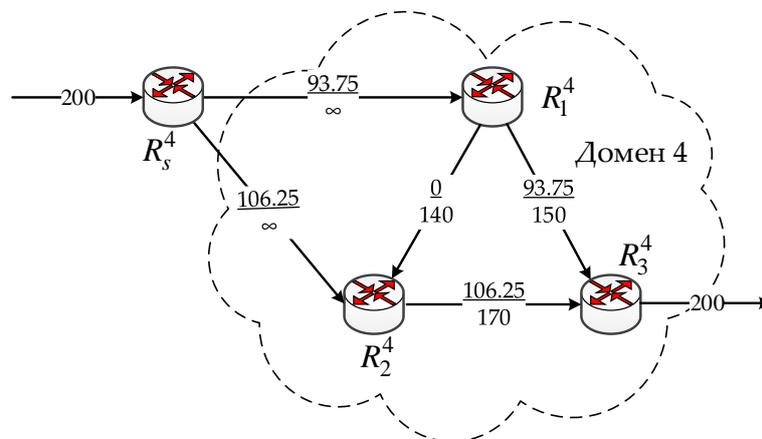
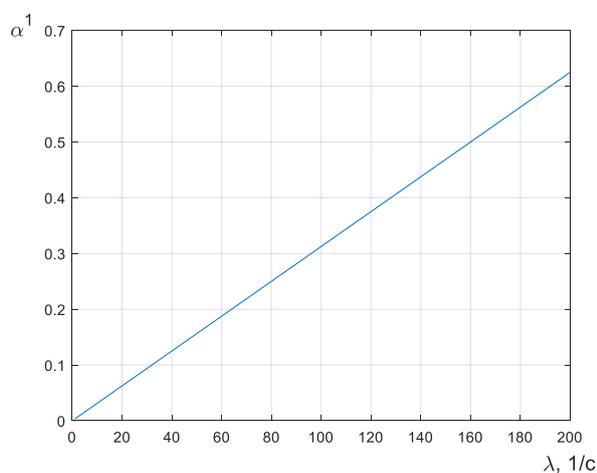


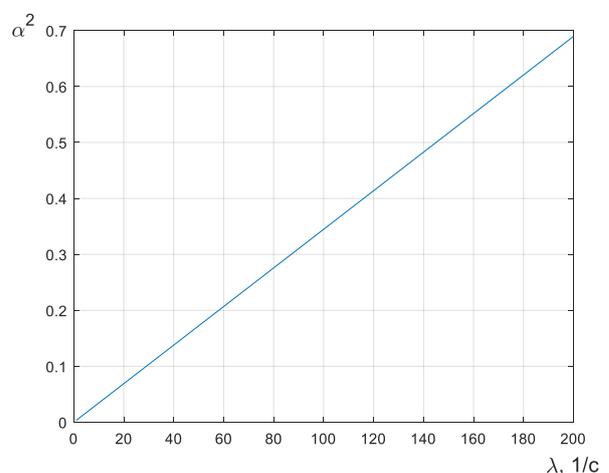
Рис. 6. Пример введения фиктивного узла-истока в четвертом домене с указанием порядка маршрутизации потока интенсивностью 200 1/с

Далее для каждого из доменов, представленных подграфами  $G^p$ , определяется порядок маршрутизации и балансировки нагрузки с использованием модели (1)-(7), при этом динамически управляемый порог максимальной загруженности каналов  $p$ -го домена, который необходимо минимизировать, обозначим как  $\alpha^p$ .

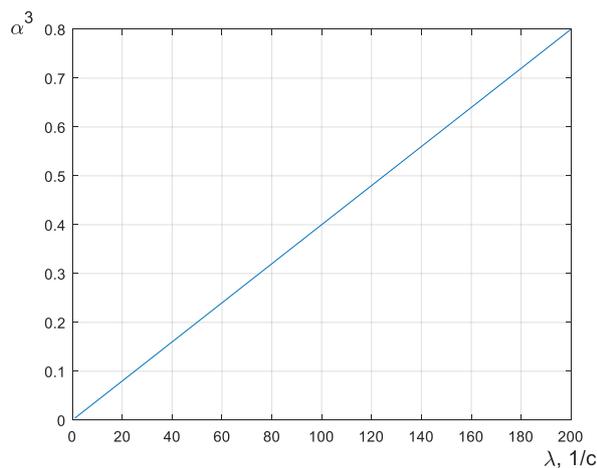
В ходе проводимого исследования интенсивность входного потока  $\lambda$  для каждого домена, как и для сети в целом, изменялась в пределах от 1 до 200 1/с. Так, например, на рис. 3 – рис. 6 показан порядок маршрутизации потока интенсивности 200 1/с в каждом из доменов сети. В разрывах каналов связи указаны их пропускные способности (знаменатель дроби) и значения интенсивности протекающих по ним потоков пакетов (числитель дроби). Полученные результаты расчетов показали, что с увеличением интенсивности входного потока  $\lambda$  порог максимальной загруженности каналов каждого  $p$ -го домена сети  $\alpha^p$  растет линейно (рис. 7).



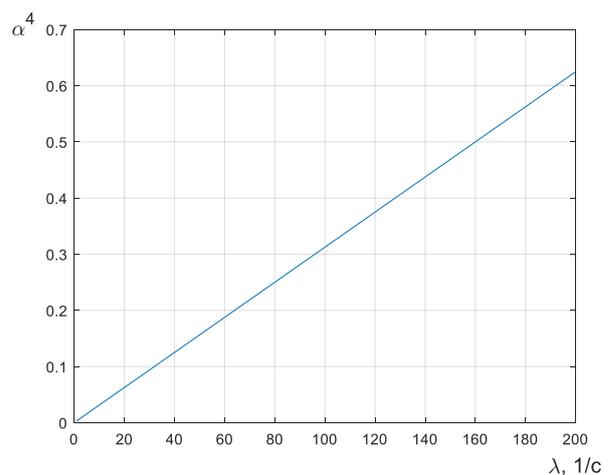
а) домен 1



б) домен 2



в) домен 3



г) домен 4

Рис. 7. Зависимость порога максимальной загруженности каналов  $p$ -го домена  $\alpha^p$  от интенсивности входного потока  $\lambda$

Ввиду линейности получаемых зависимостей (рис. 7), можно сделать вывод, что пропускная способность  $p$ -го домена при передаче пакетов потока в выбранном направлении является константой и может быть определена как

$$c^p = \alpha^p \cdot \lambda. \quad (11)$$

Так, для первого домена ТКС при значении интенсивности потока, например,  $\lambda = 200$  1/с (рис. 3, рис. 7 а), рассчитанное значение порога максимальной загруженности каналов составило  $\alpha^1 = 0,625$ . Поэтому пропускная способность первого домена (11) составляла  $c^1 = 320$  1/с. Такое же значение пропускной способности первого домена можно получить и при рассмотрении любой другой точки на графике, приведенном на рис. 7 а. Основываясь на полученных результатах (рис. 4 – рис. 7) в соответствии с выражением (11) были аналогично рассчитаны также пропускные способности второго, третьего и четвертого доменов:  $c^2 = 290$  1/с,  $c^3 = 250$  1/с и  $c^4 = 320$  1/с.

*На втором этапе* предлагаемого диакоптического метода происходит построение модели агрегированной структуры сети, в которой, основываясь на результатах проведенных расчетов первого этапа, каждый  $p$ -й домен сети представляется эквивалентным каналом связи  $\bar{E}^p$  с пропускной способностью  $c^p$ , который соединяет маршрутизаторы  $R_s^p$  и  $R_t^p$ . Полученная в результате такого преобразования агрегированная структура ТКС может быть представлена в виде графа  $G^A = (R^A, E^A \cup E^{p,q})$ , где  $R^A = \{R_s^p, R_t^p; p = \overline{1, N}\}$  – множество эквивалентных маршрутизаторов;  $E^A = \{\bar{E}^p; p = \overline{1, N}\}$  – множество эквивалентных каналов связи;  $E^{p,q}$  – множество междоменных каналов связи. Агрегированная структура исследуемой сети рис. 1, получаемая на втором этапе предлагаемого метода, приведена на рис. 8.

*На третьем этапе* метода с использованием модели (1)-(7) производится расчет порядка маршрутизации уже для полученной агрегированной структуры сети. В результате данного расчета определяются интенсивности потоков как в междоменных каналах связи, так и потоков, которые поступают и убывают из каждого  $p$ -го домена. Полученное на третьем этапе решение назовем макрорешением задачи маршрутизации в заданной сети. Макрорешение задачи маршрутизации для рассматриваемого примера структуры сети (рис. 1) при интенсивности входного потока в 200 1/с также приведено на рис. 8. Для полученного решения (рис. 8) численное значение порога максимальной загруженности каналов ТКС (1) равно 0,7143, как и для варианта централизованного расчета (рис. 1).

На рис. 9 приведен график зависимости значения порога максимальной загруженности каналов ТКС  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  для агрегированной структуры исследуемой сети. Как видно из приведенного графика, эта зависимость также носит линейный характер.

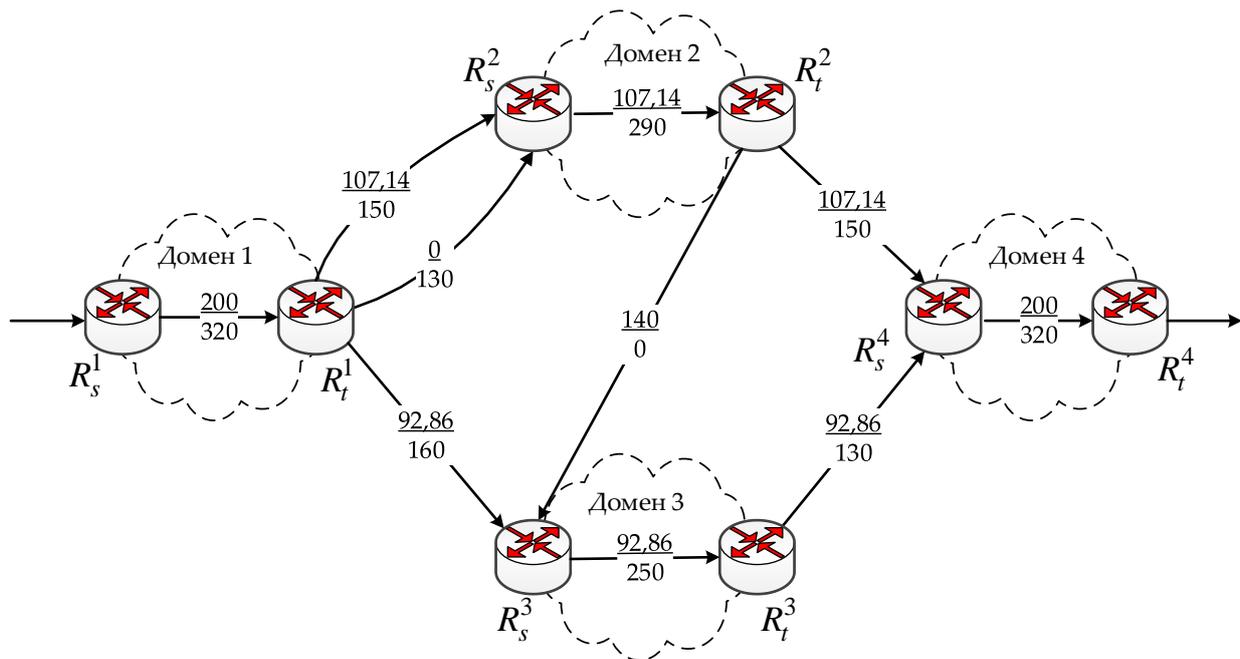


Рис. 8. Агрегированная структура сети и получаемый для нее порядок маршрутизации

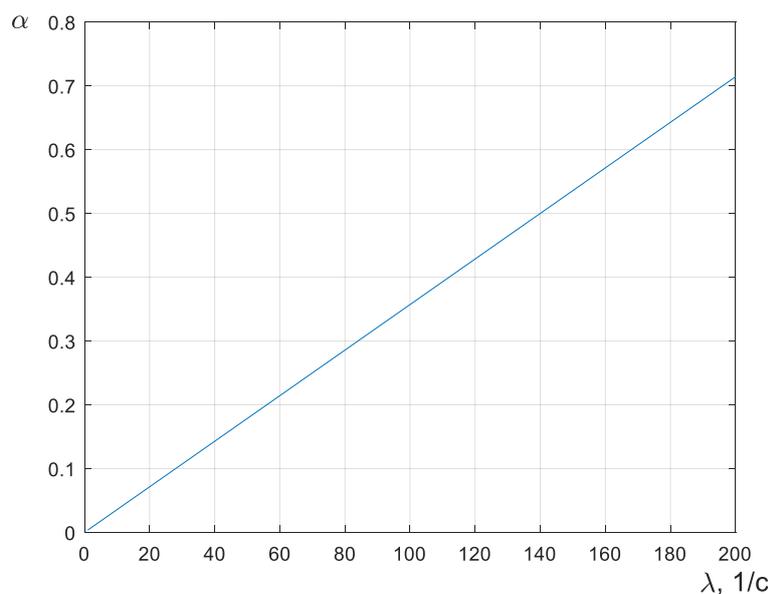


Рис. 9. Зависимость порога максимальной загрузки каналов  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при макрорешении задачи маршрутизации для агрегированной структуры ТКС

На четвертом этапе предлагаемого метода на основании полученных значений интенсивности потока, поступающего в каждый из доменов, решаем задачу маршрутизации в каждом из доменов отдельно, используя математическую модель (1)-(7) для подграфов  $G^p$ . Таким образом получается микрорешение задачи маршрутизации, уточняющее финальный порядок распределения потоков по каналам связи каждого

отдельного домена. Полученные на четвертом этапе микрорешения для каждого домена в совокупности совместно с макрорешением для междоменных каналов определяют порядок диакоптического решения задачи маршрутизации для исследуемой сети, которое приведено на рис. 10.

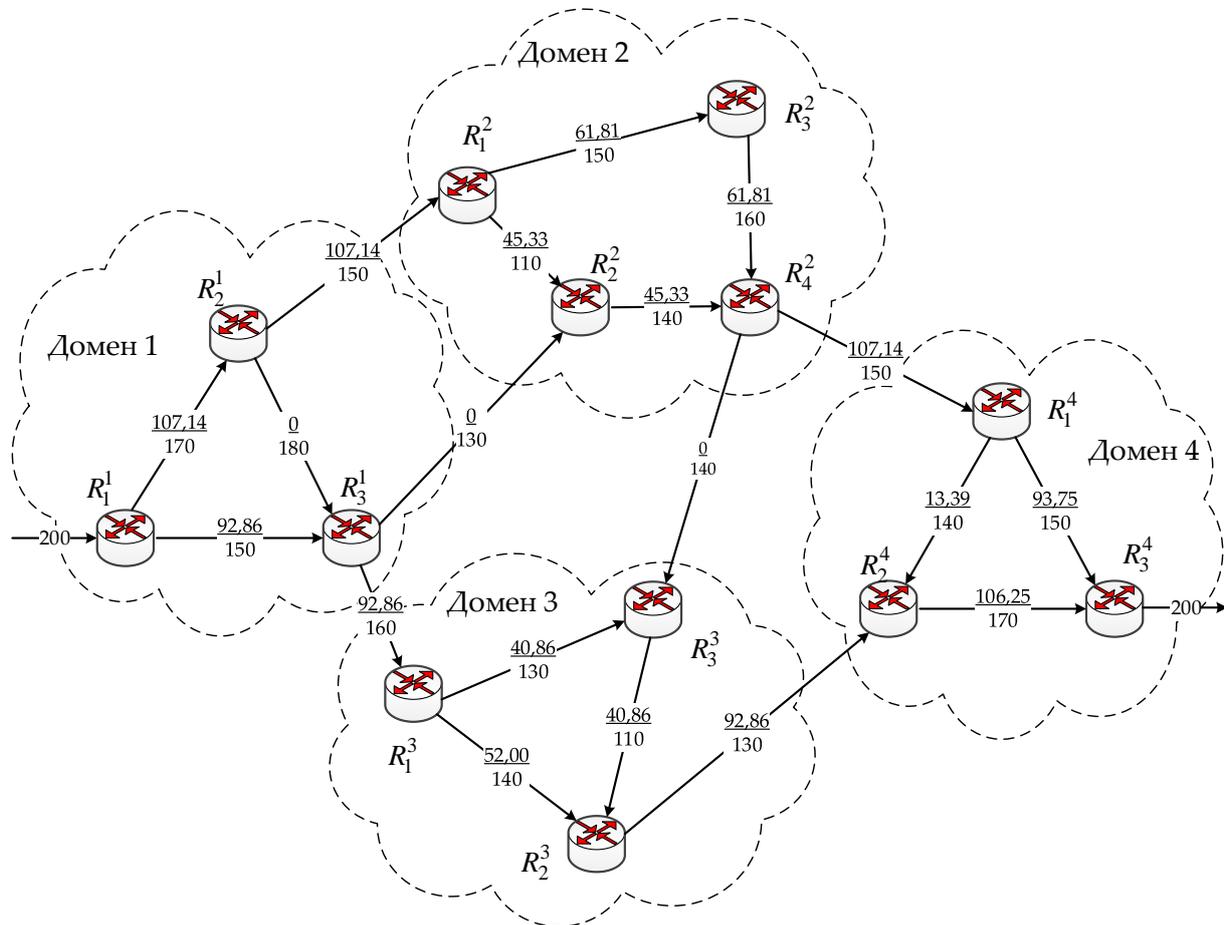


Рис. 10. Диакоптическое решение задачи маршрутизации в ТКС

Стоит отметить, что получаемый с помощью предложенного диакоптического метода порядок маршрутизации (рис. 10) в общем случае не соответствует распределению потоков, полученному в ходе централизованной маршрутизации (рис. 1). Но эффективность полученных маршрутных решений, оцениваемых критерием (1), полностью идентична. Так для приведенного решения (рис. 10) численное значение порога максимальной загруженности каналов ТКС (1) равно 0,7143, совпадая с соответствующим значением, полученным в ходе централизованного расчета (рис. 1).

Этот вывод можно обобщить и для других вариантов значений интенсивности входного потока. Так на рис. 11 приведен график зависимости значения порога максимальной загруженности каналов ТКС  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  в случае применения предложенного диакоптического подхода к решению задачи маршрутизации. Приведенная зависимость (рис. 11) полностью соответствует аналогичным результатам, полученным в ходе централизованной маршрутизации и приведенным на рис. 2.

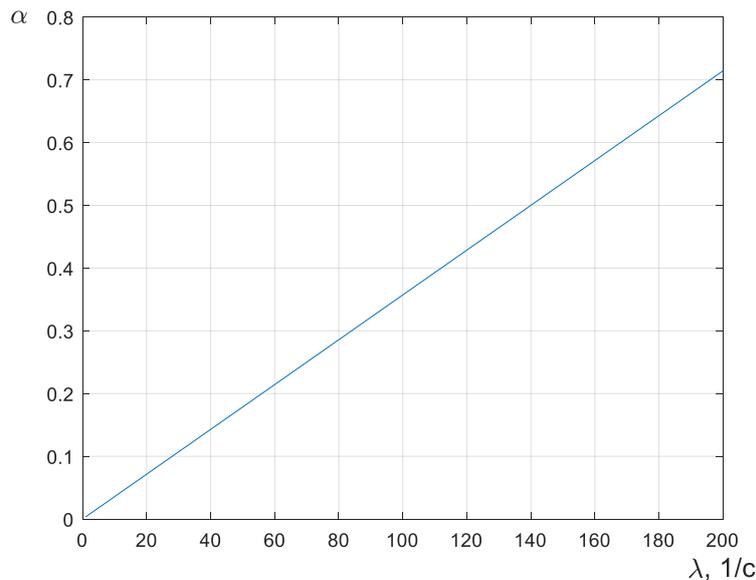


Рис. 11. Зависимость порога максимальной загрузки каналов  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при диакоптическом решении задачи маршрутизации в ТКС

#### IV. Анализ диакоптического метода междоменной маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационной сети

С целью расширенного анализа работы предложенного диакоптического метода междоменной маршрутизации рассмотрим второй вариант сети, в которой, в отличие от предыдущего примера (рис. 1), «узкое место» с точки зрения пропускной способности каналов связи находится не внутри домена, а в одном из междоменных каналов. Сама структура исследуемой сети совпадает с рассмотренной ранее (рис. 1) за исключением значений пропускных способностей каналов между доменами 1 и 3, доменами 2 и 3, а также доменами 2 и 4, которые были уменьшены со значений 160 1/с, 140 1/с и 150 1/с до значений 100 1/с, 120 1/с и 120 1/с соответственно.

Пример централизованного решения задачи маршрутизации потока интенсивностью 200 1/с, протекающего в данной сети между маршрутизаторами  $R_1^1$  и  $R_3^4$ , представлен на рис. 12. В разрывах каналов связи приведены интенсивность потока, протекающего в данном канале (в числителе дроби), и пропускная способность канала (в знаменателе дроби). Для полученного решения (рис. 12) численное значение порога максимальной загрузки каналов ТКС (1) равно 0,8.

Результаты проведенного анализа централизованного решения задачи маршрутизации показали, что с увеличением интенсивности входного потока в пределах от 1 до 200 1/с значение порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$ , как и в первом примере (рис. 2), растет линейно (рис. 13).

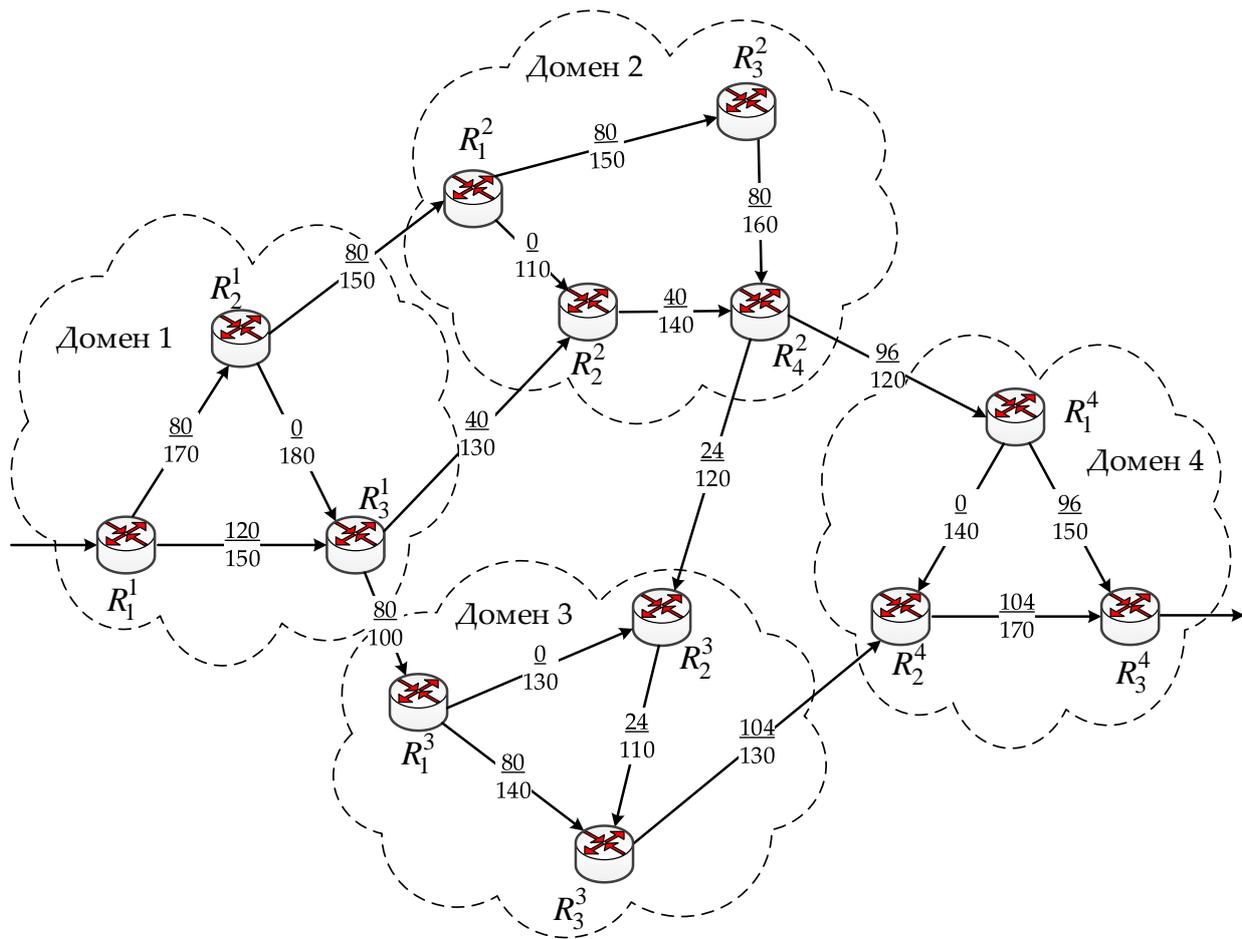


Рис. 12. Порядок централизованной маршрутизации в мультидоменной ТКС (вариант 2)

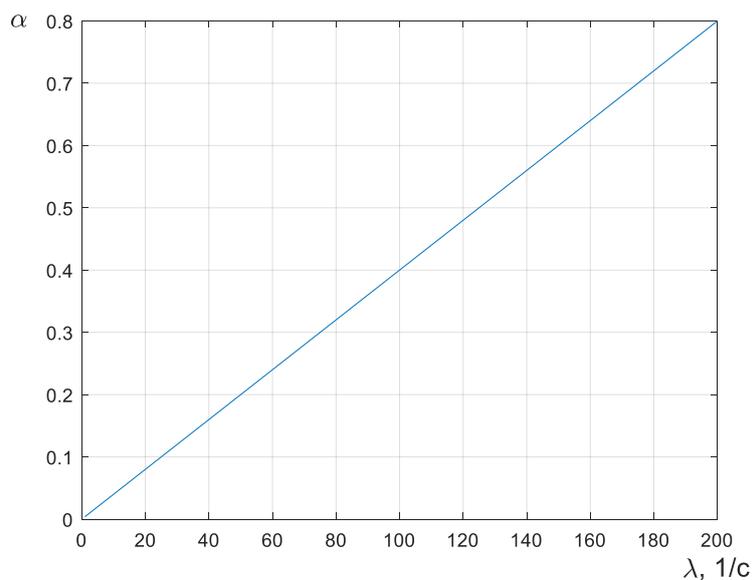


Рис. 13. Зависимость порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при централизованном решении задачи маршрутизации (вариант 2)

В соответствии с предлагаемым диакоптическим методом определяются пропускные способности каждого домена заданной ТКС. Но поскольку структуры всех доменов и пропускные способности всех внутридоменных каналов связи остались прежними, то стоит воспользоваться результатами расчета, полученными на рис. 3 – рис. 7, т.е.  $c^1 = 320$  1/с,  $c^2 = 290$  1/с,  $c^3 = 250$  1/с и  $c^4 = 320$  1/с.

Структура агрегированной сети с введением эквивалентных каналов связи, соответствующих каждому отдельному домену, представлена на рис. 14. На этом же рисунке показано макрорешение задачи маршрутизации потока интенсивностью 200 1/с, где в разрывах каналов связи в знаменателе дроби указаны пропускные способности данных КС, а в числителе дроби – интенсивность потока, протекающего в соответствующем канале. Для полученного решения (рис. 14) значение порога максимальной загрузки каналов ТКС (1) также равно 0,8.

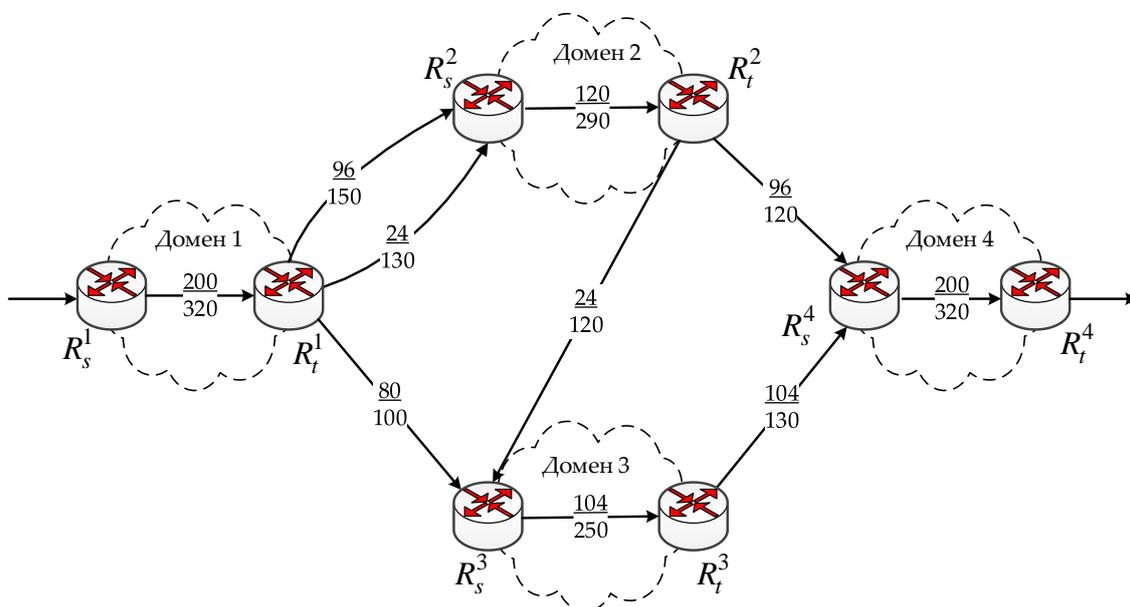


Рис. 14. Агрегированная структура сети и получаемый для нее порядок маршрутизации (вариант 2)

На рис. 15 приведен график зависимости значения порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  для агрегированной структуры второго примера исследуемой сети. Сравнив полученные решения, приведенные на рис. 12 и рис. 14, можно сделать вывод, что распределение потоков в междоменных КС, рассчитанное в результате решения задачи маршрутизации для агрегированной сети, не совпадает с централизованным решением. Однако значения порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$ , представленные на рис. 13 и рис. 15), полностью совпадают.

В рамках предложенного метода решения, представленные на рис. 14 и касающиеся интенсивности потоков в междоменных каналах и самих доменах, выступают в

качестве исходных данных для расчета порядка маршрутизации в каждом из доменов и последующего диакоптического объединения в единое решение (рис. 16).

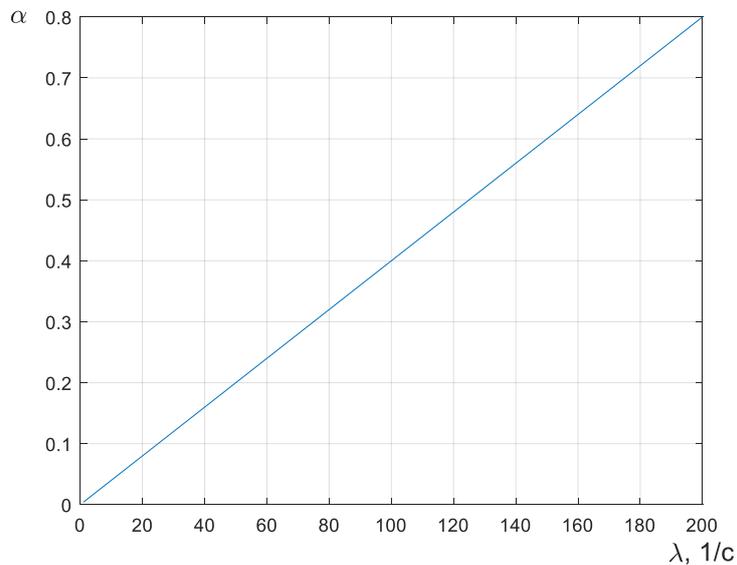


Рис. 15. Зависимость порога максимальной загрузки каналов  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при макрорешении задачи маршрутизации для агрегированной структуры ТКС (вариант 2)

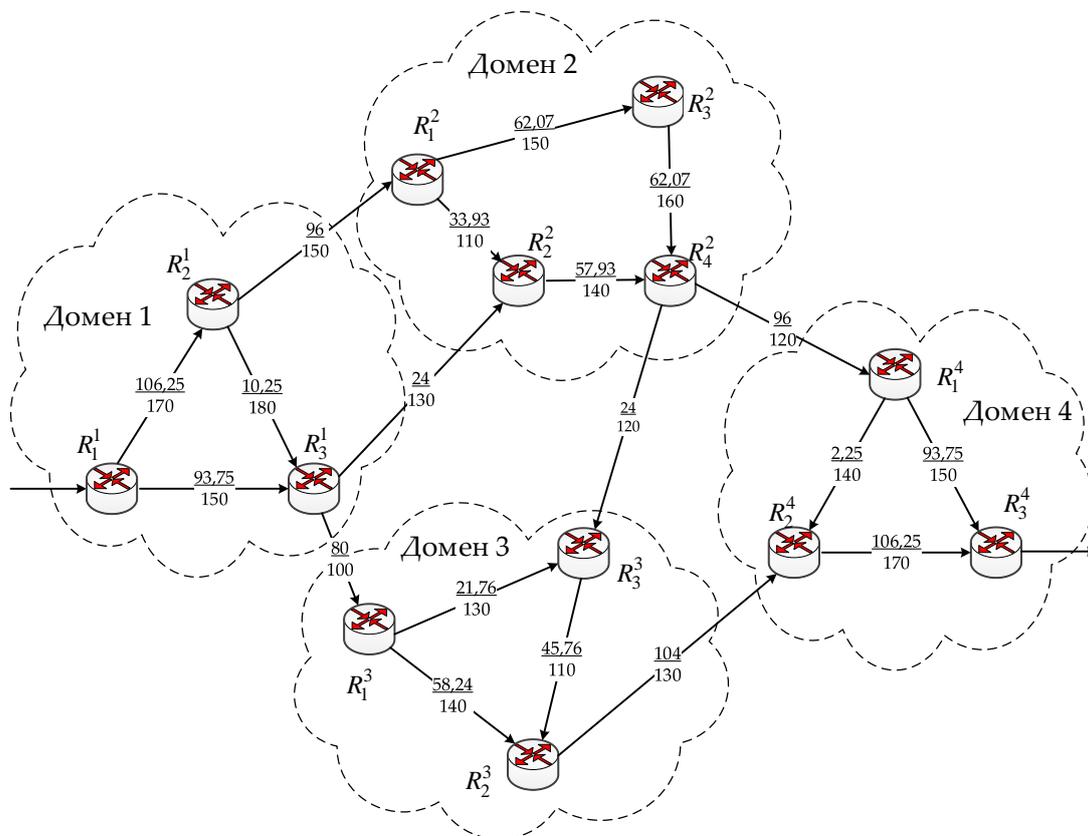


Рис. 16. Диакоптическое решение задачи маршрутизации (вариант 2)

Для финального решения (рис. 16) численное значение порога максимальной загрузки каналов ТКС (1) снова равно 0,8, т.е. полностью совпадает с эффективностью централизованного решения задачи маршрутизации в мультидоменной ТКС.

Сравнение централизованного и диакоптического решений (рис. 12 и рис. 16,) показывает, что, как и в первом примере, были получены различные варианты маршрутизации и балансировки потоков в каналах сети, как внутри, так и между доменами, однако значения порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$  при этом совпадают, т.е. диакоптический подход дает решение задачи маршрутизации аналогично централизованному.

В подтверждение общности полученного решения на рис. 17 представлен график зависимости значения порога максимальной загрузки каналов сети  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при применении предложенного диакоптического подхода к решению задачи маршрутизации для второго примера структуры сети.

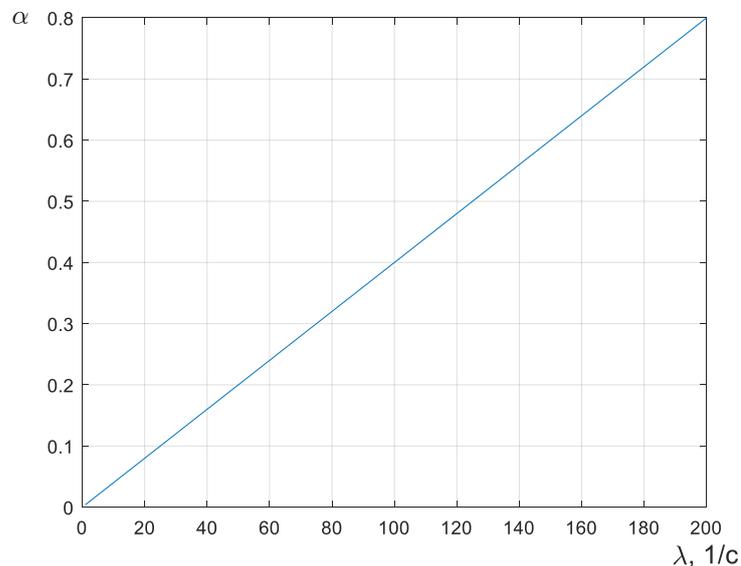


Рис. 17. Зависимость порога максимальной загрузки каналов  $\alpha$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  при диакоптическом решении задачи маршрутизации в ТКС (вариант 2)

Как и для первого примера, данная зависимость носит линейный характер в случае централизованного решения задачи маршрутизации, а также для решений, полученных на всех этапах предложенного диакоптического метода: для отдельно взятых доменов сети, макрорешения задачи маршрутизации для агрегированной структуры сети и для итогового диакоптического решения, получаемого путем совмещения решений, рассчитанных на макро- и микроуровне (уровне доменов).

## Выводы

В статье предложен диакоптический метод междоменной маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационной сети, который основан на отказе от

централизованных расчетов с реализацией идеи разбиения общей задачи маршрутизации в мультидоменной телекоммуникационной сети на несколько подзадач меньшей сложности, решаемых для каждого отдельного домена, с последующим их объединением в обобщенное решение для всей ТКС в целом. На различных этапах метода использована потоковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки, которая отвечает требованиям концепции Traffic Engineering (1)-(7) и связана с минимизацией порогового значения максимальной загруженности каналов связи.

Предложенный диакоптический метод междоменной маршрутизации с балансировкой нагрузки в телекоммуникационной сети состоит из следующих этапов:

1. Определение обобщенных пропускных способностей каждого домена анализируемой ТКС.
2. Построение модели агрегированной структуры сети, в которой каждый  $p$ -й домен сети представляется эквивалентным каналом связи с уже известной (определенной на первом этапе) пропускной способностью.
3. Основываясь на полученной модели агрегированной структуры сети, во-первых, производится расчет порядка маршрутизации потоков в междоменных каналах связи, а во-вторых, определяются интенсивности потоков, которые поступают и убывают из каждого  $p$ -го домена ТКС.
4. Уточняется финальный порядок маршрутизации потоков с балансировкой нагрузки в каждом из доменов ТКС в отдельности, который согласуется с полученным порядком маршрутизации потоков в междоменных каналах связи.

Важно отметить, что расчеты первых двух этапов проводятся однократно, так как пропускная способность доменов не зависит от интенсивности потока, поступающего в ТКС. Таким образом, основу метода составляют третий и четвертый этапы, которые задействуются при изменении интенсивности входного потока. Основным достоинством диакоптического метода является отказ от централизации проводимых расчетов, что положительно сказывается на масштабируемости конечных маршрутных решений и уровне требований к вычислительной мощности маршрутизаторов (сервера маршрутов). Это связано с тем, что в рамках четвертого этапа метода расчеты, связанные с определением порядка маршрутизации в каждом из доменов сети, можно распараллелить и осуществлять автономно друг от друга. При этом с ростом числа доменов в ТКС размерность маршрутных задач, которые решаются отдельно в каждом из них, будет значительно снижаться по отношению к размеру исходной маршрутной задачи, которая соответствует централизованной маршрутизации.

В ходе анализа предлагаемого диакоптического метода в работе были рассмотрены два варианта структуры мультидоменной ТКС: в первом случае «узкое место» (по пропускной способности) в сети находилось внутри домена, во втором – на уровне междоменных каналов связи. Полученные результаты подтвердили адекватность и работоспособность предлагаемых решений, когда размерность исходной расчетной задачи удавалось значительно снизить (пропорционально числу доменов), а эффектив-

ність діакоптического підходу з точки зору значення порога завантаженості каналів зв'язу ТКС повністю відповідає централізованій маршрутизації. При цьому пропонується діакоптический метод, який дозволяє вирішити проблему масштабованості відомої централізованої моделі маршрутизації, являючись її суттєвим недоліком і обмежуючим її практичне впровадження в протокольні рішення для мультидомених ТКС.

### Список літератури:

1. *Веґешна Ш.* Качество обслуживания в сетях IP / Пер. С англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 368 с.
2. *Barreiros M., Lundqvist P.* QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations. – Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, 2nd Edition, Wiley, 2016. – 254 p.
3. *Halabi S.* Internet Routing Architectures (2nd Edition). – Cisco Press, 2000. – 521 p.
4. *Medhi D., Ramasamy K.* Network Routing, Second Edition: Algorithms, Protocols, and Architectures, (The Morgan Kaufmann Series in Networking) 2nd Edition. – Cambridge, MA, USA: Elsevier Inc., 2018. – 1018p.
5. *Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С.* Технология и протоколы MPLS. – СПб.: БХВ, 2005. – 304 с.
6. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с.
7. *Cisco Networking Academy.* Routing Protocols Companion Guide. Pearson Education. Cisco press, 2014. – 756 p.
8. *Misra S., Goswami S.* Network Routing: Fundamentals, Applications, and Emerging Technologies 1st Edition. – Wiley, 2017. – 536 p.
9. *Поповский ВВ., Лемешко А.В., Мельникова Л.И., Андрушко Д.В.* Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Том.4. Вып. № 4. – С. 372-382.
10. *Lee G.M., Choi J.S.* A survey of multipath routing for traffic engineering // Springer-Verlag. – 2005. – P. 635-661
11. *Segall A.* The Modeling of Adaptive Routing in Data Communication Networks // IEEE Transactions on Communications. – January 1977. – Vol. 25. – P. 85–95.
12. *Rak J.* Resilient Routing in Communication Networks (Computer Communications and Networks), 1st edition. – Springer, 2015.
13. *Lemeshko O. V., Yeremenko O. S.* Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes // 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST). – Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Croatia, 12-14 Oct. 2016. – P. 225-230.
14. *Lemeshko O., Yeremenko O.* Dynamic presentation of tensor model for multipath QoS-routing // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET). – Lviv, Ukraine, 23-26 Feb. 2016. – P. 601-604.
15. *Лемешко О.В., Єременко О.С.* Динамічна модель маршрутизації при забезпеченні якості обслуговування за показником ймовірності своєчасної доставки пакетів // XI

Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 285-287.

16. *Lemeshko O., Drobot O.* A Mathematical Model of Multipath QoS-based Routing in Multiservice Networks // Proceedings of International conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, 2006. – P. 72-74.

17. *Lin S. C., Akyildiz I. F., Wang P., Luo M.* QoS-aware Adaptive Routing in Multi-layer Hierarchical Software Defined Networks: A Reinforcement Learning Approach // 2016 IEEE International Conference on Services Computing (SCC). – San Francisco, CA, USA, 27 June-2 July 2016. – P. 25-33.

18. *Romanov O.I., Nesterenko M.M., Veres L.A., Hordashnyk Y.S.* IMS: Model and calculation method of telecommunication network's capacity // 2017 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 11-15 Sept. 2017. – P. 1-4.

19. *Wright B.* Inter-area routing, path selection and traffic engineering. white paper. – Data Connection Limited, 2003. – 42 p.

20. *Vutucury S.* Multipath routing mechanisms for traffiv engineering and quality of service in the Internet. – PhD dissertation, University of California, USA 2001. – 152 p.

21. *Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J.* A traffic engineering approach based on minimum-delay routing // 2000 IEEE Ninth International Conference on Computer Communications and Networks. – Las Vegas, 16-18 Oct. 2000. – P. 42-47.

22. *Seok Y., Lee Y., Choi Y., Kim C.* Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing // Information Networking: Wired Communications and Management. – Sept. 2002. – Vol. 2343. – P. 278-288.

23. *Wang Y., Wang Z.* Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proceedings Eight International Conference Computer Communications and Networks. – Boston, USA, 11-13 Oct. 1999. – P. 582-588.

24. *Lemeshko O., Vavenko T., Ovchinnikov K.* Design of multipath routing scheme with load balancing in MPLS-network // 2013 IEEE XIIth International Conference THE EXPERIENCE OF DESIGNING AND APPLICATION OF CAD SYSTEMS IN MICROELECTRONICS. – Polyana-Svalyava-(Zakarpattya), UKRAINE, 19-23 February 2013. – P. 211-213.

25. *Mersni A., Ilyashenko A., Vavenko T.* Complex Optimality Criterion for Load Balancing with Multipath Routing in Telecommunications Networks of Nonuniform Topology // 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM). – Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, 21-25 February 2017. – P. 100-104.

26. *Mersni A., Ilyashenko A. E.* Complex criterion of load balance optimality for multipath routing in telecommunication networks of nonuniform topology // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – Vol. 76, Issue 7. – P. 579-590.

27. *Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O.* Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting // Transport and Telecommunication Journal. – June 2017. – Vol. 18, No. 2. – P. 155-167.

28. *Евсеева О.Ю.* Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в телекоммуникационных сетях методом предсказания взаимодействия // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2003. – Вып.21. – С. 102-111.

29. *Yeremenko O., Lemeshko O., Nevzorova O., Hailan A.M.* Method of hierarchical QoS routing based on network resource reservation // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UKRCON). – Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June 2017. – P. 971-976.

30. *Лемешко А.В., Ахмад М. Хайлан, Семеняка М.В.* Модель и метод иерархической маршрутизации на основе резервирования ресурсов в сети IP/IntSev // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 163. – С. 79-84.

31. *Nevzorova Ye.S., Arous K.M., Salakh M.T.R.* Method for hierarchical coordinated multicast routing in a telecommunication network // Telecommunication and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75. – P. 1137-1151.

32. *Лемешко А.В., Хайлан А.М.* Многоуровневое управление трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 35 – 44.

33. *Yevsyueva O.* Diakoptical approach in telecommunication engineering // 2010 IEEE Modern problems of radio engineering, telecommunication and computer science (TCSET'2010). – Lviv, Ukraine, 2010. – P. 29.

34. *Kron G.* Diakoptics; the piecewise Solution of Large-Scale System. – MacDonald, London, 1963. – 166 p.