

УДК 621.391

# АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ КООРДИНАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#), [Е.С. НЕВЗОРОВА](#), [К.М. АРУС](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – Analysis of factors influencing on the coordination procedure convergence in the implementation of hierarchical routing in telecommunication network (TCN) was performed, where the major factors are the TCN scale, routers connectivity and network utilization in a whole. Within the chosen for investigation model and method of hierarchical routing based on goal coordination the use of modified link metric was proposed. Links metric increases proportionally to remoteness of these links (by number of nodes) corresponding to the source node or destination node. The use of the routing metric modification allowed to reduce the number of iterations of coordination procedure from 1,5-2 to 3,5-5 times, and in some cases up to 8 times, as was shown by the numerical calculation results for a number of network structures and different network utilization. The use of the proposed solutions in practice will lead to a proportional reduction of service information volume within TCN related to the implementation of hierarchical routing, as well as improve efficiency of the whole network management. This is typical for a high network utilization which defines the scope of the preferred using of the proposed solutions in practice for modification of existing or development of new routing protocols. Solutions proposed in this article are oriented primarily on TCN based on source routing.

**Анотація** – Проведено аналіз факторів, що впливають на збіжність координаційної процедури при реалізації ієрархічної маршрутизації в телекомунікаційній мережі (ТКМ), до основних з яких віднесено розмірність ТКМ, зв'язності її маршрутизаторів і завантаженість мережі в цілому. В рамках обраної для дослідження моделі і методу ієрархічної маршрутизації, заснованого на принципі цільової координації, запропоновано використовувати модифіковану метрику каналів зв'язку мережі, яка збільшується пропорційно віддаленості цих каналів (за числом вузлів) до відповідного вузла-відправника або одержувача. Це дозволило знизити число координуючих ітерацій від 1,5-2 до 3,5-5 разів, що на практиці призведе до пропорційного зниження обсягів циркулюючої в ТКМ службової інформації, пов'язаної з реалізацією ієрархічної маршрутизації, а також підвищити оперативність управління мережею в цілому.

**Аннотация** – Проведен анализ факторов, влияющих на сходимость координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации в телекоммуникационной сети (ТКС), к основным из которых отнесены размерность ТКС, связности ее маршрутизаторов и загруженность сети в целом. В рамках выбранной для исследования модели и метода иерархической маршрутизации, основанного на принципе целевой координации, предложено использовать модифицированную метрику каналов связи сети, которая увеличивается пропорционально удаленности этих каналов (по числу узлов) до соответствующего узла-отправителя или получателя. Это позволило снизить число координирующих итераций от 1,5-2 до 3,5-5 раз, что на практике приведет к пропорциональному снижению объемов циркулирующей в ТКС служебной информации, связанной с реализацией иерархической маршрутизации, а также повысит оперативность управления сетью в целом.

## Введение

Достаточно часто сдерживающим фактором протокольной реализации новых математических моделей и методов маршрутизации в современных телекоммуникационных сетях (ТКС) является низкая масштабируемость результирующих решений. При этом под масштабируемостью понимается свойство ТКС как сложной системы сохранять в заданных пределах показатели своей эффективности, прежде всего производительности, при росте ее размерности – числа узлов и каналов связи;

численности пользователей и генерируемых ими информационных потоков; количества показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) и их типов.

Как показывает практика [1, 2], традиционный выход из создавшегося положения видится в переходе к иерархическим (многоуровневым) решениям, сочетающим преимущества централизованного и распределенного (децентрализованного) управления. При иерархической маршрутизации (ИМ) выделяется не один (как при централизованной), а некоторое множество серверов маршрутов – маршрутизаторов разных уровней подчинения. Каждый маршрутизатор нижнего уровня иерархии, как правило, отвечает за организацию процесса маршрутизации во вверенной ему подсети ТКС, что сопровождается снижением объемов циркулирующего служебного трафика, размеров маршрутных таблиц и повышением оперативности в управлении сетью в целом. Однако распределение функций маршрутизации между несколькими равноправными устройствами непременно может вызвать несогласованность в управлении общим сетевым ресурсом, а в конечном итоге и его преждевременную перегрузку. В качестве подобного ресурса может выступать, например, пропускная способность каналов связи, принадлежащих различным подсетям ТКС. Поэтому в ходе ИМ маршрутизаторы верхнего уровня должны обеспечивать согласованность функционирования устройств нижнего уровня иерархии путем координации их работы, что является достаточно сложной и нетривиальной научной и практической задачей.

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

Иерархическая маршрутизация нашла свое широкое применение как в IP-сетях, которые служат транспортной основой сетей следующего поколения (Next Generation Network, NGN), так и в сетях, построенных на базе технологии ATM. ИМ предполагает декомпозицию исходной ТКС на множество подсетей различного уровня иерархии. При этом в технологии IP в качестве подобных подсетей верхнего уровня могут выступать автономные системы (Autonomous system, AS) [1], а примером подсетей нижнего уровня могут служить OSPF-области (*OSPF areas*) или IS-IS-зоны (*IS-IS areas*), на которые, в свою очередь, могут разбиваться AS, маршрутизаторы которых функционируют под управлением протоколов OSPF или IS-IS соответственно [2, 3]. В ATM-технологии за реализацию иерархической маршрутизации отвечает протокол PNNI, предполагающий декомпозицию ATM-сети на множество кластеров (доменов) [4].

Как показал проведенный анализ, основным недостатком уже реализованных на практике технологических решений, касающихся ИМ, является то, что протоколы OSPF, IS-IS и PNNI преимущественно базируются лишь на топологической (структурной) иерархии ТКС, которая, к сожалению, не подкреплена иерархией функциональной. Это проявляется прежде всего в том, что данные протоколы используют никак не адаптированные под многоуровневые решения, но достаточно простые с

вычислительной точки зрения комбинаторные алгоритмы (Дийкстры и др.) поиска кратчайшего пути на графе, которым, как правило, описываются подсети нижнего уровня. Однако для обеспечения максимизации преимуществ иерархической маршрутизации целесообразно, чтобы в основу соответствующих протоколов были положены теория и методы многоуровневой оптимизации иерархических систем [5, 6], т.к. только с их помощью возможно корректно увязать между собой задачи подсетей и маршрутизаторов различных уровней иерархии с задачами, которые положены на ТКС в целом.

Основные подходы, связанные с применением теории иерархических многоуровневых систем для решения задач маршрутизации в ТКС, изложены в работах [7-13]. При этом в трудах [7-10] решение задач иерархической маршрутизации основано на использовании динамических моделей ТКС, представленных разностными уравнениями состояния сети, а в статьях [11-13] предложен подход, в рамках которого удалось формализовать процессы потоковой маршрутизации «от источника» (on source) с помощью алгебраических линейных уравнений. В этих же работах, во-первых, показано, что эффективность реализации иерархической маршрутизации во многом определяется скоростью сходимости координационной процедуры, вводимой для согласования решений нижнего уровня маршрутизации с целью предотвращения перегрузки каналов связи ТКС. Во-вторых, установлено, что число итераций в работе координационной процедуры, с одной стороны, напрямую определяет время решения задачи иерархической маршрутизации, а с другой – обуславливает объем циркулирующего в сети служебного трафика, связанного с координацией. В этой связи актуальной представляется научная и практическая задача, связанная с анализом сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации в ТКС и выработке рекомендаций по снижению числа итераций в ней для повышения масштабируемости маршрутных решений в целом.

## II. Модель иерархической маршрутизации

Для решения поставленной задачи будет взята за основу математическая модель потоковой маршрутизации, описанная в работах [11, 14]. Тогда для каждого узла-отправителя пакетов в ТКС в качестве искомым выступают переменные  $x_{ij}^{k,r}$ , равные доле интенсивности  $k_r$ -го потока пакетов, передаваемого по каналу  $(i, j) \in E$ ;  $\lambda^{k,r}$  – интенсивность  $k_r$ -го потока, где  $k_r$  –  $k$ -й поток пакетов, поступающий в сеть через  $r$ -й приграничный маршрутизатор ( $k_r \in K_r$ ), а  $E$  – множество каналов связи в ТКС,  $K_r$  – множество потоков, маршрутизируемых  $r$ -м приграничным маршрутизатором. В качестве известных будут выступать следующие данные: структура ТКС;  $M$  – множество приграничных маршрутизаторов, наделенных функциями маршрутизации пакетов;  $\varphi_{ij}$  – пропускная способность канала связи  $(i, j) \in E$ .

С целью предотвращения потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом необходимо обеспечить выполнение условия сохранения потока:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = 1, \text{ если } i\text{-й маршрутизатор} - \text{узел-источник} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = 0, \text{ если } i\text{-й маршрутизатор} - \text{транзитный узел;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r} = -1, \text{ если } i\text{-й маршрутизатор} - \text{узел-получатель} \end{array} \right. \quad (1)$$

Система уравнений (1) должна выполняться для каждого потока пакетов. Кроме того, с целью предотвращения перегрузки каналов связи мультипотокным трафиком важно выполнить условия:

$$\sum_{r \in M} \sum_{k_r \in K} \lambda^{k_r} x_{ij}^{k_r} \leq \varphi_{ij}. \quad (2)$$

Условие (2) ориентировано на централизованную маршрутизацию, когда все переменные  $x_{ij}^{k_r}$  ( $r \in M$ ,  $(i, j) \in E$ ) определяются на едином сервере маршрутов. При реализации иерархически-координационной маршрутизации подобными серверами выступают маршрутизаторы из множества  $M$ . В этом случае условия (2) примут следующий вид [11]:

$$\sum_{k_r \in K_r} \lambda^{k_r} x_{ij}^{k_r} \leq \varphi_{ij} - \sum_{\substack{s \in M \\ s \neq r}} \sum_{k_s \in K_s} \lambda^{k_s} x_{ij}^{k_s}. \quad (3)$$

Физический смысл выражения (3) определяется тем, что агрегированный поток, маршрутизируемый  $r$ -м маршрутизатором, не должен по своей интенсивности превышать пропускной способности канала связи, оставшейся после обслуживания потоков, поступающих через другие приграничные маршрутизаторы.

Для обеспечения реализации многопутевой маршрутизации на маршрутные переменные накладываются ограничения вида:

$$0 \leq x_{ij}^{k_r} \leq 1. \quad (4)$$

В векторно-матричной форме условия (1) и (3) можно представить в виде:

$$A_r \vec{x}_r = \vec{a}_r, \quad (5)$$

$$B_r \vec{x}_r \leq D_r \vec{\varphi} - \sum_{\substack{s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \vec{x}_s, \quad (6)$$

где  $\vec{x}_r$  – вектор, координатами которого являются искомые переменные  $x_{ij}^{k_r}$ ;  $\vec{\varphi}$  – вектор пропускных способностей каналов связи ТКС с координатами  $\varphi_{ij}$ ;  $A_r$ ,  $B_r$ ,  $D_r$ ,  $C_{rs}$ ,  $\vec{a}_r$  – согласующие матрицы, т.к. размерности векторов  $\vec{x}_r$  ( $r \in M$ ) и  $\vec{\varphi}$ , а также нумерациях их координат в общем случае могут не совпадать.

В ходе расчёта векторов искомым переменных  $\bar{x}_r$  ( $r \in M$ ) в качестве критерия оптимальности получаемых решений будет выбран минимум следующей целевой функции:

$$\begin{aligned} & \min F, \\ & F = \sum_{r \in M} \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r, \end{aligned} \quad (7)$$

в которой  $H_r$  – диагональная матрица весовых коэффициентов, координатами которой, как правило, являются маршрутные метрики каналов связи ТКС,  $[\cdot]^t$  – функция транспонирования вектора (матрицы).

### III. Метод иерархической маршрутизации на основе принципа целевой координации

Основываясь на подходе, предложенном в работе [11], для решения сформулированной оптимизационной задачи, связанной с минимизацией выражения (7) при наличии ограничений (4)-(6), используем принцип целевой координации [5, 6]. Тогда, переходя к задаче на безусловный экстремум,

$$\min_x F = \max_{\mu} L,$$

необходимо максимизировать по  $\bar{\mu}$  лагранжиан вида:

$$L = \sum_{r \in M} \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \sum_{r \in M} \bar{\mu}_r^t (B_r \bar{x}_r - D_r \bar{\varphi} + \sum_{\substack{s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s), \quad (8)$$

где  $\bar{\mu}$  – вектор множителей Лагранжа, а  $\bar{\mu}_r$  – подвекторы вектора  $\bar{\mu}$ , отнесенные к каждому из условий (6).

В рамках принципа целевой координации лагранжиан (8) представим в виде [11]:

$$L = \sum_{r \in M} L_r, \quad (9)$$

$$L_r = \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{\mu}_r^t (B_r \bar{x}_r - D_r \bar{\varphi} + \sum_{\substack{s \in M \\ s \neq r}} \bar{\mu}_s^t C_{sr} \bar{x}_r), \quad (10)$$

предположив, что величины  $\bar{\mu}_r$  являются фиксированными и формируются на верхнем уровне иерархии.

Таким образом, целевая функции (9) приобретает сепарабельную форму, а общая проблема иерархической маршрутизации оказалась декомпозированной на ряд маршрутных задач (10). Решение задачи, связанной с минимизацией по переменным (4) выражения (10), определяет нижний уровень расчётов, а на верхнем уровне основной задачей является координация решений, полученных на нижнем уровне, с целью

недопущения перегрузки каналов связи (6) путём модификации векторов множителей Лагранжа в ходе выполнения градиентной итерационной процедуры:

$$\bar{\mu}_r(\alpha + 1) = \bar{\mu}_r(\alpha) + \nabla \bar{\mu}_r, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – номер итерации;  $\nabla \bar{\mu}_r$  – градиент функции, который рассчитывается исходя из получаемых на верхнем уровне результатов решения задач маршрутизации на каждом конкретном узле-отправителе:

$$\nabla \mu_r(x) \Big|_{x=x^*} = B_r \bar{x}_r^* - D_r \bar{\varphi} + \sum_{\substack{s \in M \\ s \neq r}} C_{rs} \bar{x}_s^*, \quad (12)$$

где  $\bar{x}_r^*$  ( $r \in M$ ) – результат решения, полученный нижним уровнем иерархии на текущей итерации.

#### IV. Анализ влияния на сходимость координационной процедуры загрузки ТКС при реализации иерархической маршрутизации

Исследование сходимости процедуры (11), (12) для примера рассмотрено для структуры сети, представленной на рис. 1. Сеть состояла из шести маршрутизаторов ( $M1 \div M6$ ) и девяти каналов связи. В разрывах каналов связи показана их пропускная способность (1/с). Для наглядности рассматривалось два потока. Первый поток пакетов передавался от первого маршрутизатора к третьему, а второй поток – от пятого к третьему. Максимальная интенсивность потоков от каждого отправителя составляла 200 1/с, т.к. при интенсивностях выше 200 1/с наблюдалась перегрузка каналов связи ТКС.

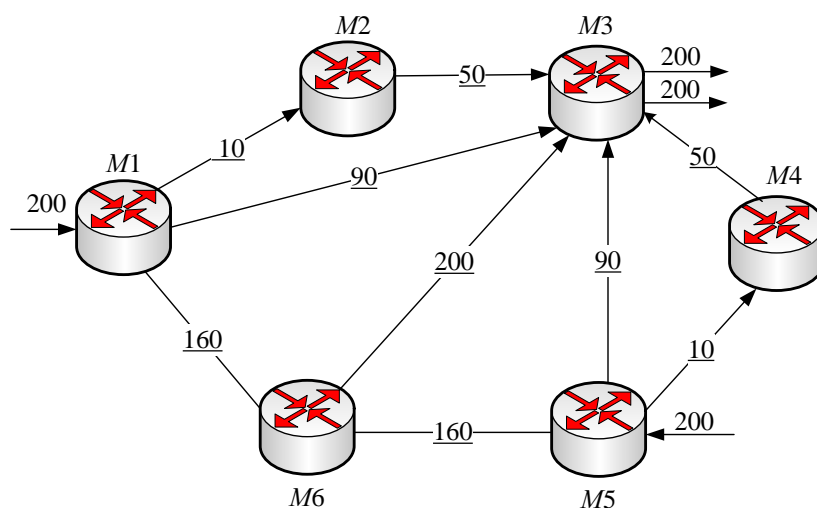


Рис. 1. Первый вариант структуры исследуемой сети

В ходе исследования был проведён анализ влияния загрузки ТКС, т.е. интенсивности потоков пакетов, на число итераций координирующей процедуры (11), (12). Интенсивность потоков изменялась с шагом 20 1/с, общее число просчитываемых вариантов составило 100. Из табл. 1 видно, что с ростом интенсивностей потоков увеличивается и количество координирующих итераций, т.е. замедляется сходи-



мость метода иерархически-координационной маршрутизации (8)-(12) из-за необходимости борьбы с перегрузкой некоторых каналов связи ТКС. Максимальное количество итераций равнялось 13 и наблюдалось при максимально возможной загрузке ТКС, т.е. при интенсивностях в 200 1/с для каждого потока.

Табл. 1. Результаты сравнительного анализа сходимости метода

№ варианта расчета	Интенсивность первого потока пакетов, 1/с	Интенсивность второго потока пакетов, 1/с	Количество итераций в методе (8)-(12)	Количество итераций при использовании (13)
1	20	20	1	1
2	40	20	1	1
...	...	...	...	...
10	200	20	3	2
...	...	...	...	...
57	140	180	7	2
58	140	200	8	2
...	...	...	...	...
92	200	40	3	2
...	...	...	...	...
98	200	160	9	2
99	200	180	12	2
100	200	200	13	2

Рассмотрим результат маршрутизации потоков для предельной загрузки ТКС (вариант расчета №100 в табл. 1), т.е. когда интенсивности обоих потоков составляли по 200 1/с. На первой итерации результат решения задачи маршрутизации нижнего уровня (10) показан на рис. 2, на котором в разрывах каналов связи (сверху вниз) представлены следующие данные: интенсивность первого потока (1/с), интенсивность второго потока (1/с), пропускная способность данного канала связи.

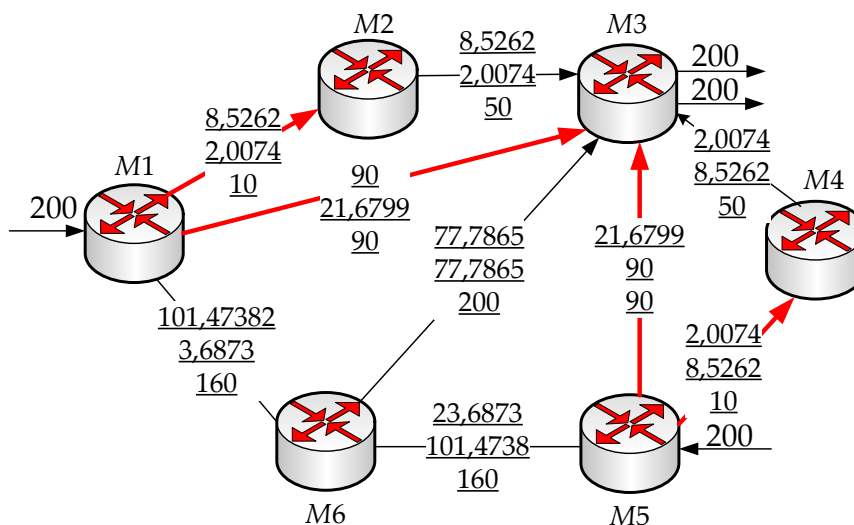


Рис. 2. Начальный порядок маршрутизации двух потоков в ТКС

Ввиду несогласованности решений, получаемых на первом и пятом приграничных маршрутизаторах, происходит перегрузка четырех каналов связи, соединяющих маршрутизаторы M1 и M2, M1 и M3, M3 и M5, M5 и M4, выделенных на рис. 2 красным цветом. Распределение потоков пакетов по каналам связи ТКС после седьмой координирующей итерации показано на рис. 3. На этой итерации перегруженными остаются два канала связи: между M1 и M2, между M5 и M4.

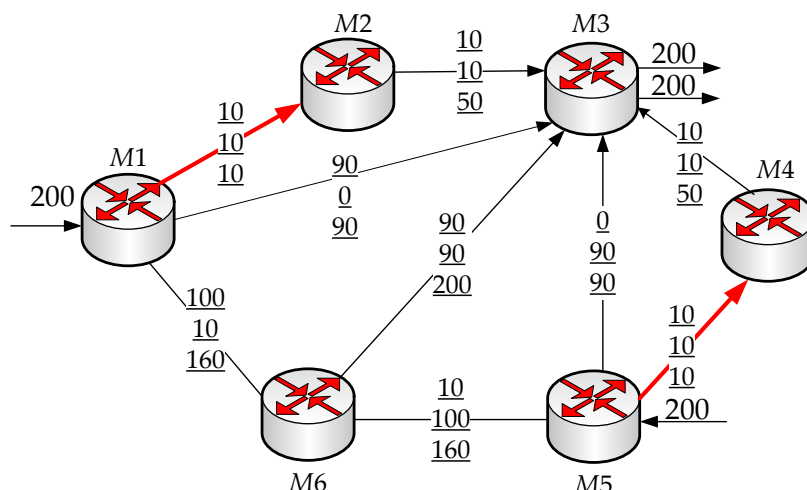


Рис. 3. Распределение потоков пакетов по каналам связи после седьмой итерации

Конечный порядок маршрутизации потоков пакетов после тринадцатой итерации показан на рис. 4. При этом ни один из каналов связи не является перегруженным передаваемыми потоками пакетов.

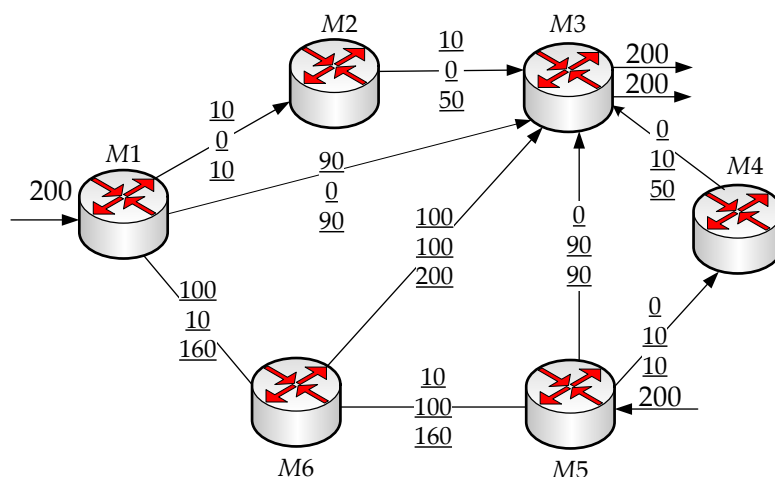


Рис. 4. Конечный порядок маршрутизации потоков пакетов после тринадцатой итерации



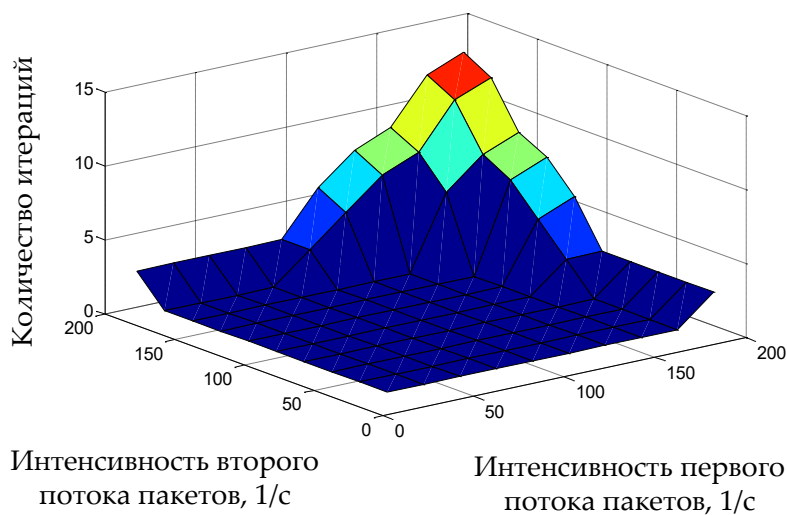
## V. Предложения по повышению сходимости координационной процедуры метода иерархической маршрутизации

В рамках принципа целевой координации количество итераций координационной процедуры (11)-(12) определяет инерционность управления трафиком в сети и объём служебного трафика, создаваемого управляющими сообщениями –  $\bar{x}_r^*$  и  $\bar{\mu}_r$  ( $r \in M$ ). Поэтому важно в ходе иерархической маршрутизации, организованной в рамках метода (8)-(12), число итераций (11) минимизировать. В ходе исследований установлено (рис. 2 – рис. 4), что причина роста числа координирующих итераций – это перегрузка удалённых по количеству переприемов от узлов отправителя или получателя каналов связи. Это обусловлено тем, что использование квадратичного критерия оптимальности (7) способствует сбалансированной загрузке всех каналов связи ТКС. В этой связи в работе для каждого потока пакетов предлагается обеспечить увеличение метрики использования им каналов связи пропорционально удалённости этих каналов (по числу узлов) до соответствующего узла-отправителя или получателя. Поэтому для каждого потока для модификации метрик предлагаются следующие выражения:

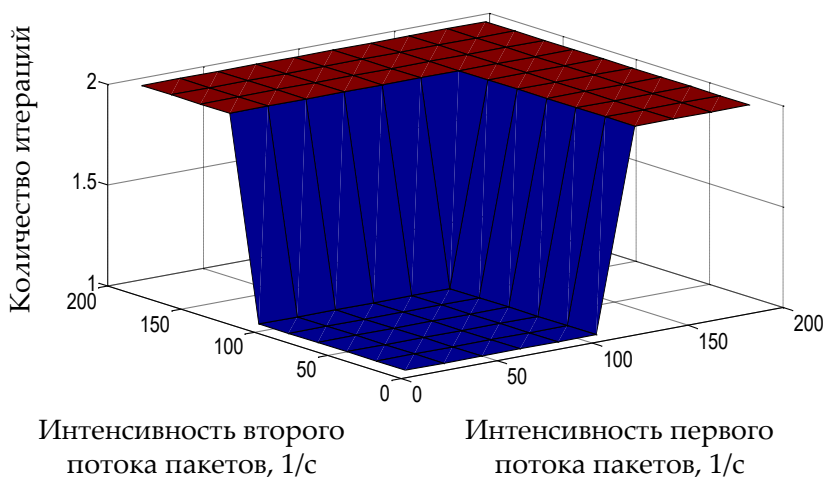
$$m_i^* = m_i^n + q \cdot p_i, \quad p_i = \min(\text{hop}_i^s, \text{hop}_i^d) - 1, \quad (13)$$

где  $m_i^n$  – метрика  $i$ -го канала связи, формирующаяся тем или другим протоколом маршрутизации;  $q$  – коэффициент изменения метрики ( $q > 0$ );  $\text{hop}_i^s$  – минимальное количество узлов между узлом-отправителем и  $i$ -м каналом связи;  $\text{hop}_i^d$  – минимальное количество узлов между узлом-отправителем и  $i$ -м каналом связи.

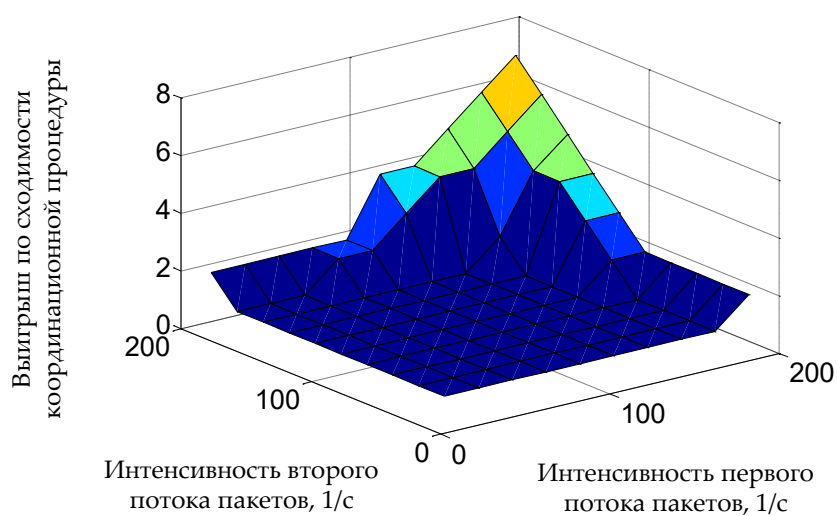
Метрика  $i$ -го канала связи подлежит изменению в зависимости от количества транзитных узлов между данным каналом и узлом-отправителем (получателем). Каналы связи, непосредственно соединённые с отправителем (получателем) пакетов, остаются с номинальной метрикой. Используя выражение (13) в рамках метода иерархической маршрутизации на основе принципа целевой координации, была также получена зависимость количества итераций от интенсивностей входящих потоков пакетов, представленная как в табл. 1, так и на рис. 5б в графическом виде. Таким образом, после проведенных исследований можно сделать вывод, что модификация метрики удаленных каналов (13) значительно повлияла на количественный результат сходимости координационной процедуры, а именно – удалось сократить число итераций в среднем от 1,5 до 5 раз в зависимости от интенсивностей передаваемых потоков пакетов (рис. 5в).



а) анализ сходимости координационной процедуры без использования выражения (13)



б) анализ сходимости координационной процедуры с использованием выражения (13)



в) выигрыш по сходимости координационной процедуры

Рис. 5. Анализ сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации для структуры ТКС, представленной на рис. 1

## VI. Анализ влияния структуры ТКС на сходимость координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации

Проведем анализ влияния особенностей структуры ТКС на сходимость координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации. Основными параметрами, которые изменялись в структуре ТКС, являлись число каналов связи, количество маршрутизаторов и их связность. В качестве примера рассмотрим вариант структуры сети, представленной на рис. 6, включающей в себя четыре маршрутизатора и пять каналов связи, т.е. размерность ТКС по сравнению с вариантом, представленным на рис. 1, снизилась.

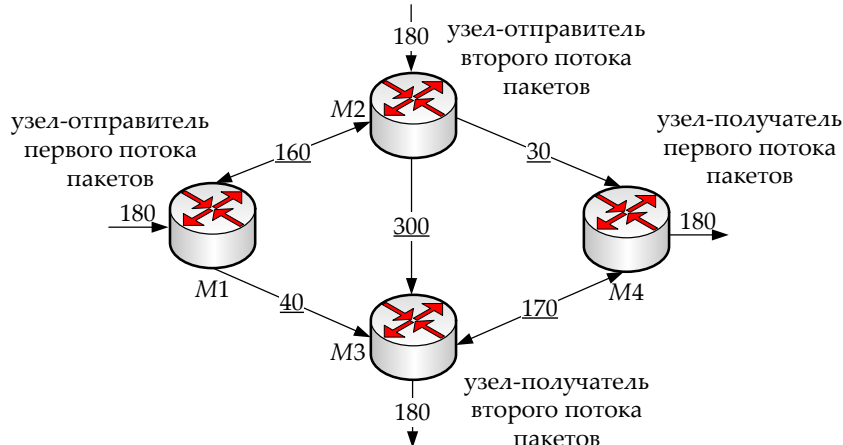


Рис. 6. Второй вариант структуры исследуемой сети

На рис. 6 в разрывах каналов связи показана их пропускная способность (1/с). Число потоков оставалось равным двум. В ходе исследования интенсивность каждого из потоков изменялась от нуля до 180 1/с. Именно при максимальной интенсивности потоков наблюдалось наибольшее число итераций координирующей процедуры, которое без использования выражения (13) равнялось семи. Начальное распределение потоков, интенсивности которых составляли по 180 1/с, показано на рис. 7.

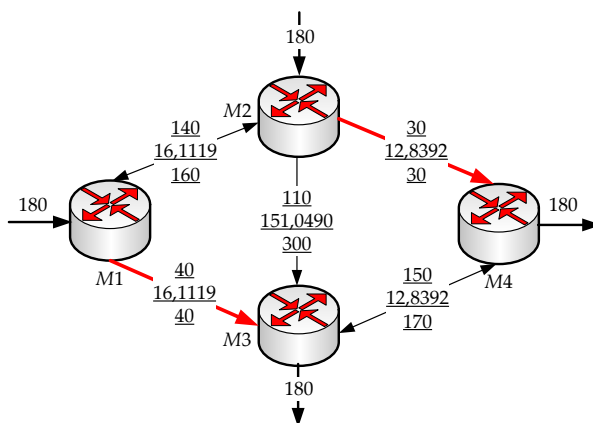


Рис. 7. Начальное распределение потоков по каналам связи

На рис. 7 в разрывах каналов связи указаны (сверху вниз) интенсивность первого потока (1/c), интенсивность второго потока (1/c), пропускная способность канала связи. Так как первый и второй маршрутизаторы автономно друг от друга маршрутизируют потоки, поступающие через них в сеть, изначально два канала связи оказываются перегруженными: между M1 и M3, M2 и M4 (они на рис. 7 выделены красным цветом). В ходе координации маршрутных решений, полученных на каждом из приграничных маршрутизаторов, характер перегрузки меняется. Так, после четвертой координирующей итерации (рис. 8) остаются перегруженными снова два, но уже других канала связи, соединяющие маршрутизаторы M2 и M4, M3 и M4.

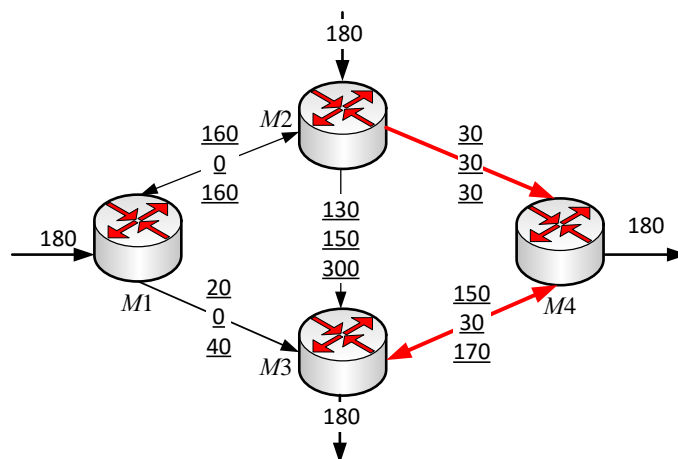


Рис. 8. Распределение потоков пакетов по каналам связи после четвертой итерации

Результирующий порядок маршрутизации потоков по каналам связи ТКС после завершения работы координирующей процедуры (11), (12) показан на рис. 9.

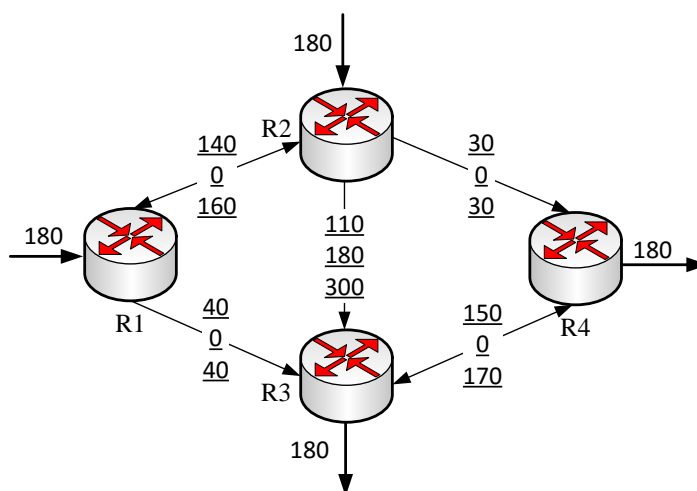
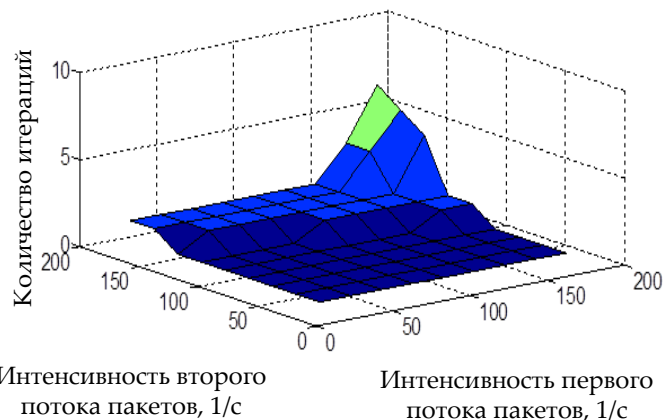


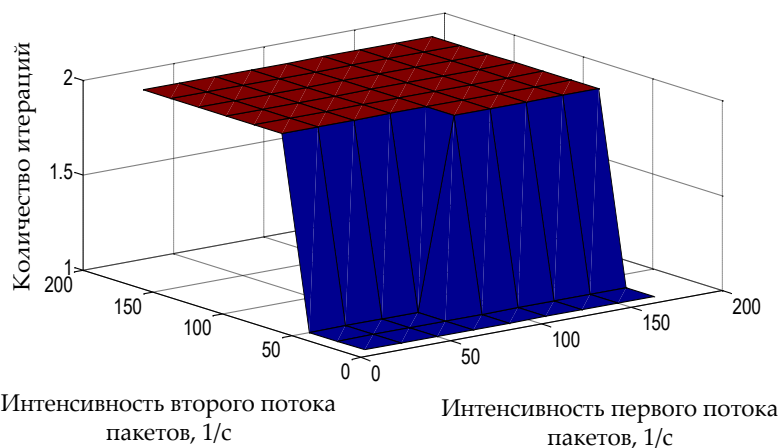
Рис. 9. Результирующий порядок маршрутизации потоков пакетов по каналам связи ТКС (после седьмой итерации)

С целью повышения скорости сходимости координирующей процедуры маршрутная метрика модифицировалась по правилу, заданном выражением (13). В

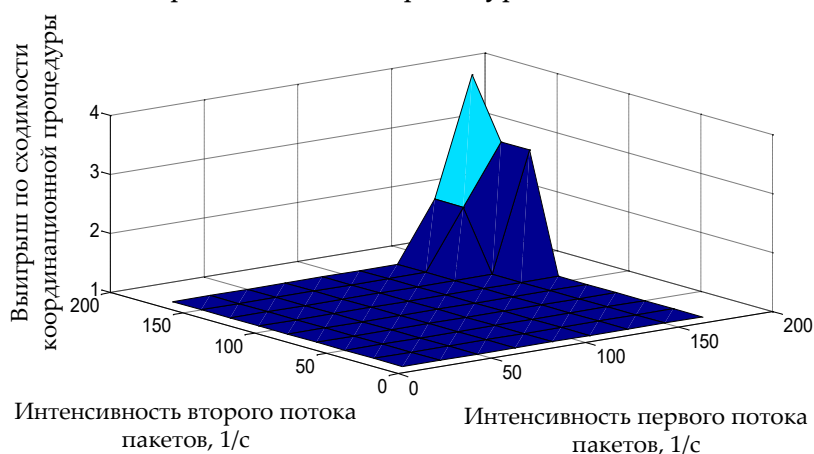
этом случае при граничных интенсивностях обоих потоков в 180 1/с максимальное число итераций составляло 2. Результаты анализа сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации для структуры ТКС, изображенной на рис. 6, представлены на рис. 10.



а) анализ сходимости координационной процедуры без использования выражения (13)



б) анализ сходимости координационной процедуры с использованием выражения (13)



в) выигрыш по сходимости координационной процедуры

Рис. 10. Анализ сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации для структуры ТКС, представленной на рис. 6

Как показано на рис. 10 модификация метрики каналов связи (13) позволяет для структуры сети, представленной на рис. 6, сократить число итераций координационной процедуры в области средних и высоких нагрузок в среднем в 1,5-2 раза, а для предельной загруженности сети – до 3,5 раз.

В ходе дальнейшего исследования рассмотрим ТКС, структура которой по сравнению с вариантом, представленным на рис. 1, имеет более высокую связность маршрутизаторов, т.е. при том же числе маршрутизаторов (шести) количество каналов связи увеличено с девяти до одиннадцати (рис.11). На рис. 11 в разрывах каналов связи снова указаны лишь их пропускные способности (1/с). Число и характеристики потоков не изменялись.

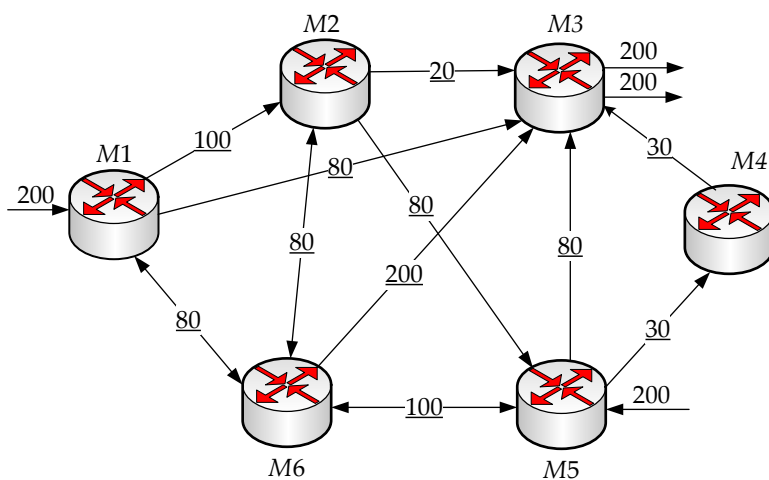


Рис. 11. Третий вариант структуры исследуемой сети

Использование стандартного метода иерархической маршрутизации на основе принципа целевой координации (8)-(12) позволил обеспечить сходимость координирующей процедуры (11), (12) за пятнадцать итераций. При этом на первой координирующей итерации перегруженными были три канала связи (на рис. 12 они выделены красным цветом).

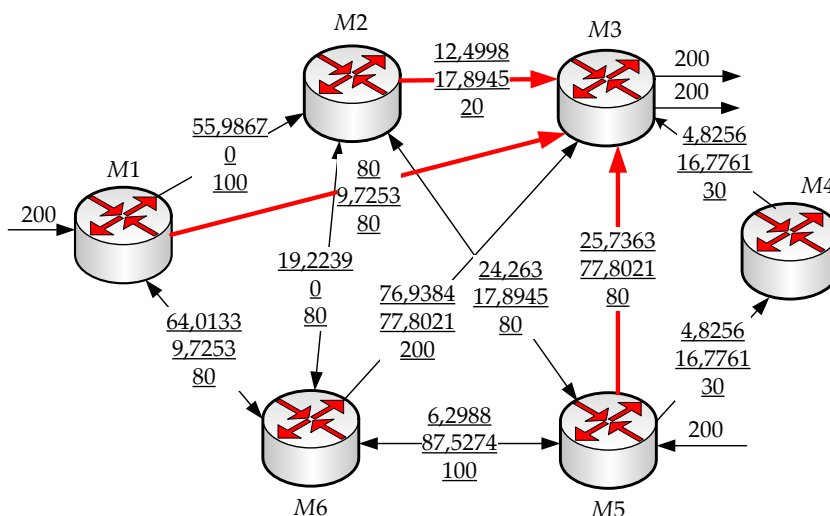


Рис. 12. Начальное распределение потоков по каналам связи



На рис. 12 в разрывах каналов связи (сверху вниз) указаны интенсивность первого потока пакетов (1/с), интенсивность второго потока (1/с), пропускная способность канала связи. После седьмой координирующей итерации перегруженных каналов осталось лишь два (рис. 13), а именно между маршрутизаторами M1 и M3, а также между M5 и M3.

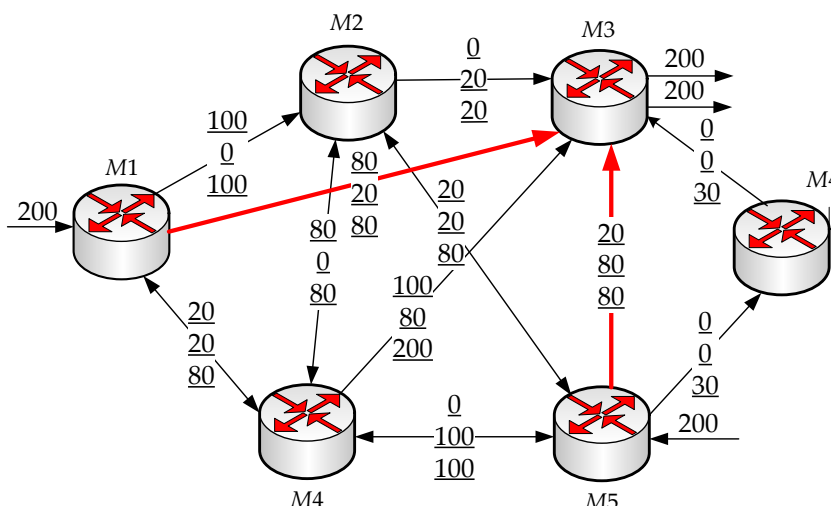


Рис. 13. Распределение потоков по каналам связи после седьмой итерации

По завершению работы координирующей процедуры (11), (12), т.е. после пятнадцатой итерации, результирующий порядок маршрутизации потоков в ТКС, структура которой представлена на рис. 11, приведена на рис. 14. Ни один из одиннадцати каналов связи перегружен не был.

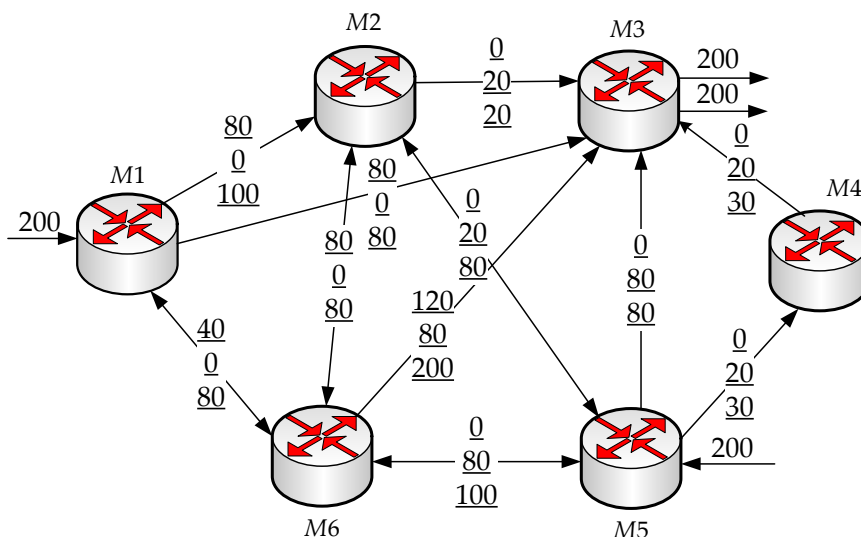
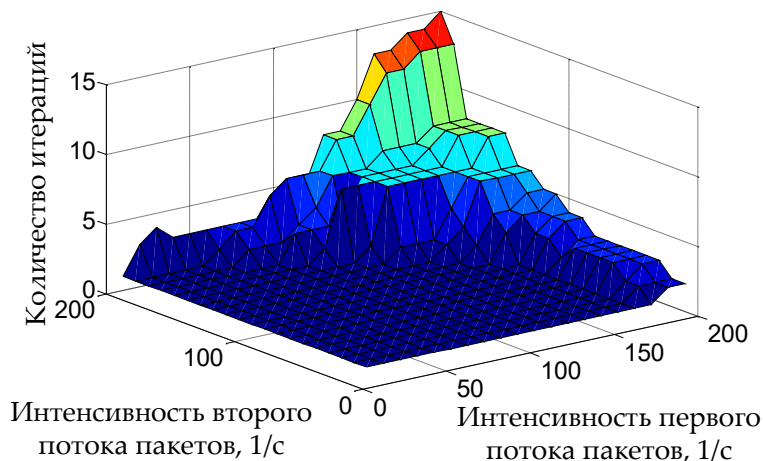


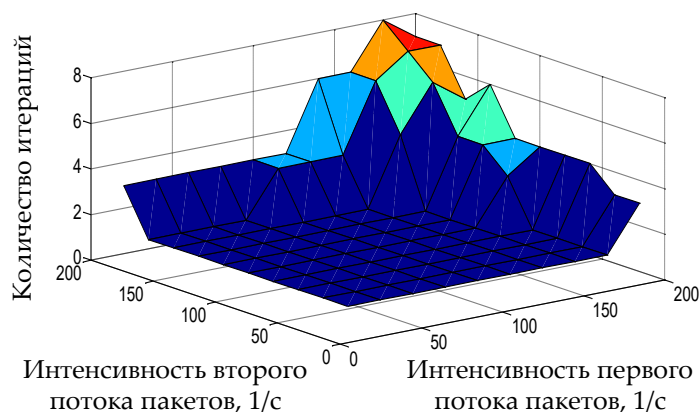
Рис. 14. Результирующий порядок маршрутизации потоков пакетов по каналам связи ТКС (после пятнадцатой итерации)

На рис. 15а графически показаны результаты анализа сходимости координирующей процедуры (11), (12), т.е. без использования выражения (13), при различной

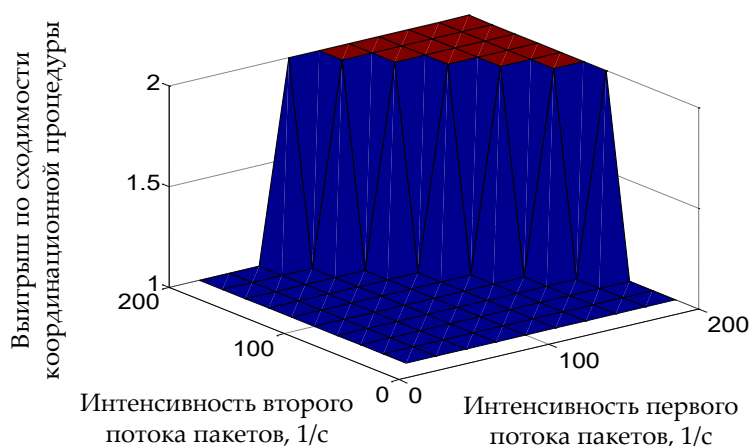
загруженности ТКС, структура которой представлена на рис. 11. При использовании модификации маршрутной метрики по правилу, установленному выражением (13), удалось сократить общее число итераций координирующей процедуры (11), (12) до восьми (рис. 15б), т.е. практически в два раза (рис. 15в).



а) анализ сходимости координационной процедуры без использования выражения (13)



б) анализ сходимости координационной процедуры с использованием выражения (13)



в) выигрыш по сходимости координационной процедуры

Рис. 15. Анализ сходимости координационной процедуры при реализации иерархической маршрутизации для структуры ТКС, представленной на рис. 11

## Выводы

1. Проведенный в статье анализ показал, что иерархическая маршрутизация является эффективным средством повышения масштабируемости решений, связанных с обеспечением качества обслуживания в ТКС. При этом важным слагаемым теоретических и протокольных решений должна стать процедура координации маршрутных решений, распределенно вырабатываемых отдельными (в т.ч. приграничными) маршрутизаторами, с целью предотвращения перегрузки совместно используемого сетевого ресурса, прежде всего, каналов связи сети.

2. Реализация функций координаций в рамках рассмотренной математической модели (1)-(7) и метода расчета (8)-(12) предполагает периодический обмен служебной информацией между различными уровнями иерархии системы маршрутизации. С целью снижения объемов циркулирующего в сети служебного трафика важно обеспечить высокую скорость сходимости координационной процедуры. В этой связи проведен количественный анализ факторов, влияющих на сходимость координационной процедуры при использовании иерархической маршрутизации. Установлено, что с ростом размерности сети, связности ее маршрутизаторов и загруженности ТКС в целом число координирующих итераций растет.

3. Экспериментальным путем установлено, что причина роста числа координирующих итераций – это перегрузка удаленных по количеству переприемов от узлов отправителя или получателя каналов связи. Это обусловлено тем, что использование квадратичного критерия оптимальности (7) способствует сбалансированной загруженности всех каналов связи ТКС. В этой связи в работе предложено использовать модификацию маршрутной метрики для каналов связи ТКС, представленной выражением (13), чтобы для каждого потока пакетов обеспечить увеличение метрики использования им каналов связи пропорционально удаленности этих каналов (по числу узлов) до соответствующего узла-отправителя или получателя.

4. Использование модификации маршрутной метрики (13) позволило, как показали численные результаты расчета для множества сетевых структур и различной загруженности сети, снизить число итераций координирующей процедуры от 1,5-2 до 3,5-5 раз, а в ряде случаев и до 8 раз. Особенно это характерно для высокой загруженности ТКС, что и определяет область предпочтительного использования предлагаемых решений на практике при модификации существующих или разработке новых протоколов маршрутизации. Решения, предложенные в данной статье, ориентированы, прежде всего, на ТКС, в которых используется маршрутизация «от источника» (on source).

## Список литературы:

1. Хелеби С., Мак-Ферсон Д. Принципы маршрутизации в Internet, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 448 с.
2. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – С.Пб.: BHV-С.Пб., 2002. – 512 с.

3. *Medhi D., Ramasamy K.* Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann, 2007. – 788 p.
4. *Uyless D. Black.* IP routing protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI and Cisco routing protocols. Prentice Hall PTR, 2000. – 287 p.
5. *Месарович М., Мако Д., Такахага И.* Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Издательство "Мир", 1973. – 344 с.
6. *Сингх М., Титли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.
7. *Шаров А.Н.* Автоматизированные сети радиосвязи. – Л.: Военная академия связи, 1988. – 172 с.
8. *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 до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_popovsky\\_functional.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_popovsky_functional.pdf).
9. *Лемешко А.В.* Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 1998. – Вып. №1. – С. 323-328.
10. *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.
11. *Lemeshko O., Ahmad M. Hailan, Ali S. Ali.* A flow-based model of two-level routing in multiservice network // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2010. – Lviv-Slavsko: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 225.
12. *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.
13. *Лемешко А.В., Ахмад М. Хайлан* Многоуровневое управление трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе координационного принципа прогнозирования взаимодействий [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 35 – 44. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_lemeshko\\_traffic.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_traffic.pdf).
14. *Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya., Kim C.* A constrained multipath traffic engineering scheme for MPLS networks // Proc. of IEEE ICC 2002. – New York. 2002 – P. 2431-2436.