

УДК 621.391

# ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ПО НЕПЕРЕСЕКАЮЩИМСЯ ПУТЯМ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ



А.С. ЕРЕМЕНКО

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – This paper provides a topical scientific problem solution related to the flow-based model development of multipath routing over disjoint paths in telecommunication network with the control of number of paths. The proposed model is a further development of the well-known model of multipath routing due to the introduction in its structure the nonlinear constraints responsible for the calculation of a non-overlapping paths and control of their total number. The model provides accounting features such as network structure, parameters of communication links and traffic characteristics. It describes a routing procedure, and multiple flows simultaneously in accordance with their mutual interference; oversees a possible overload of network elements by the conditions of flow conservation in the network nodes and the conditions to prevent overloading of communication links. The desired order of disjoint paths multipath routing was achieved in solving the optimization problem of nonlinear programming. Using the proposed model allowed the calculation of a set of non-overlapping paths with some important features with respect to their desired number. This is important when formulating and solving problems of multipath routing associated with a certain level of service quality and (or) security of transmitted data. The simulation results on the set of examples confirmed the efficiency of proposed flow-based model of multipath routing over disjoint paths with adjustable number of used paths, what can be seen including its adequacy.

**Анотация** – У роботі запропоновано розв'язання актуальної наукової задачі, пов'язаної з розробкою потокової моделі багатопутової маршрутизації за шляхами, що не перетинаються, в телекомунікаційній мережі з регулюванням кількості використовуваних маршрутів. Запропонована модель є подальшим розвитком відомої моделі багатопутової маршрутизації на підставі введення в її структуру нелінійних обмежень, що відповідають за розрахунок лише шляхів, що не перетинаються, та регулювання їх загальної кількості. Використання запропонованої моделі дозволило забезпечити розрахунок множини маршрутів, що володіє деякими важливими властивостями щодо їх необхідної кількості. Результати моделювання підтвердили працездатність запропонованої потокової моделі багатопутової маршрутизації за шляхами, що не перетинаються, з регулюванням числа використовуваних маршрутів.

**Аннотация** – В работе предложено решение актуальной научной задачи, связанной с разработкой потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в телекоммуникационной сети с регулировкой числа используемых маршрутов. Предложенная модель является дальнейшим развитием известной модели многопутевой маршрутизации за счет введения в ее структуру нелинейных ограничений, отвечающих за расчет лишь непересекающихся путей и регулировку их общего количества. Использование предложенной модели позволило обеспечить расчет множества непересекающихся маршрутов, обладающего некоторыми важными свойствами относительно их необходимого количества. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям с регулировкой числа используемых маршрутов.

## Введение

Развитие телекоммуникационных сетей (ТКС) на сегодняшний день характеризуется внедрением все большего числа инфокоммуникационных сервисов и связанного с этим упреждающим совершенствованием технологических средств обеспечения качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Традиционно важное место в перечне подобных средств отводится протоколам маршрутизации, которые во многом определяют численные значения межконцевых QoS-показателей: средней задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов и производительности ТКС в целом

[1-3], благодаря обоснованному выбору путей прохождения пакетов между парой узлов отправитель-получатель. Важно отметить, что за последнее десятилетие практически все маршрутные протоколы нарастили свою функциональность с точки зрения поддержки многопутевой маршрутизации [4]. Как показала практика и результаты многочисленных научных исследований [2-5], многопутевая маршрутизация, благодаря обеспечению балансировки нагрузки одновременно по множеству путей, способствует дальнейшему улучшению вышеперечисленных показателей QoS.

В ряде важных случаев при реализации многопутевой стратегии маршрутизации предпочтение может отдаваться использованию непересекающихся путей, в которых общими являются лишь узлы отправитель и получатель. С точки зрения обеспечения качества обслуживания выбор непересекающихся путей обоснован, например, некоторым упрощением получения решения задач по балансировке нагрузки и расчету показателей качества обслуживания [3, 5]. А при обеспечении сетевой безопасности использование непересекающихся путей в ходе многопутевой маршрутизации фрагментов передаваемого сообщения позволяет существенно снизить вероятность компрометации передаваемых данных [6-9].

На рис. 1а, например, пути, проходящие через узлы  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6$ ,  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6$  и  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ , являются непересекающимися, если узлы 1 и 6 – это отправитель и получатель пакетов соответственно. Тогда узлы 2-5 являются транзитными, т.е. они осуществляют лишь переприем пакетов передаваемого потока.

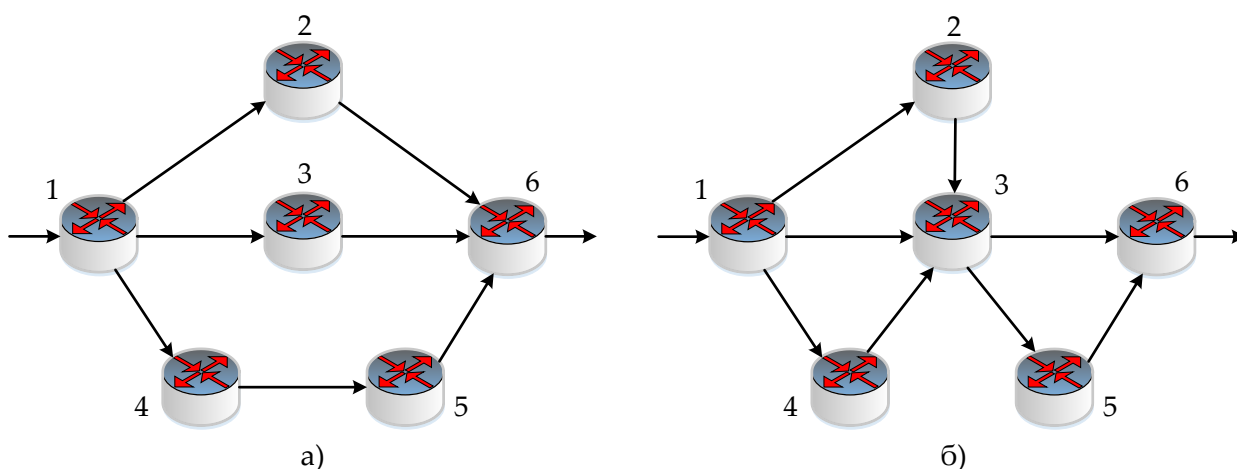


Рис. 1. Примеры используемых путей при многопутевой маршрутизации

Если пути содержат хотя бы один общий узел и (или) канал, то они называются пересекающимися. На рис. 1б для той же пары узлов отправитель-получатель представлены примеры пересекающихся путей, при этом пути  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6$  и  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6$  имеют узловое пересечение (узел 3), а пути  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6$  и  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 6$  допускают канальное пересечение, т.к. у них общий канал между узлами 3 и 6. Нетрудно заметить, что пути с узловым пересечением всегда являются подмножеством путей с канальным пересечением.

Для расчета непересекающихся путей в настоящее время преимущественно используются графокомбинаторные модели и алгоритмы [1, 4], которые обладают невысокой вычислительной сложностью и хорошей масштабируемостью. Примером этому могут служить многочисленные модификации алгоритма Дейкстры [10], которые положены в основу протоколов многопутевой маршрутизации SMR (Split Multipath Routing) и AODVM (AODV-Multipath), используемые в беспроводных ТКС. В области безопасной маршрутизации модифицированный алгоритм Дейкстры также используется при поиске множества непересекающихся путей в MANET для передачи по ним фрагментов секретного сообщения согласно протоколу SPREAD (Secure Protocol for REliable dAta Delivery) с целью обеспечения максимальной защищенности от несанкционированного доступа к передаваемым данным и их возможного перехвата [6, 7].

Несмотря на отмеченные достоинства, графокомбинаторные решения имеют и ряд серьезных недостатков, которые сдерживают их использование в современных мультисервисных ТКС. К основным из них относятся, прежде всего, отсутствие учета характеристик передаваемых потоков пакетов, что усложняет работу средств борьбы с перегрузкой каналов связи ТКС, а также сложность в расчете и регулировке количества используемых непересекающихся путей. В этой связи все больше внимания в научных исследованиях, посвященных многопутевой маршрутизации в т.ч. по непересекающимся путям, уделяется использованию потоковых моделей [2-5], в рамках которых характеристики передаваемого в сети трафика учитываются более полно по сравнению с графокомбинаторными моделями.

Поэтому актуальной представляется научная и практическая задача, связанная с разработкой новых математических моделей многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям, которые могут быть положены в основу соответствующих маршрутных протоколов как для обеспечения заданного уровня качества обслуживания, так и для повышения безопасности передаваемых данных.

## **I. Базовая потоковая модель многопутевой маршрутизации**

При разработке потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям за основу была взята модель, предложенная в [2]. При этом к ее достоинствам можно отнести следующие:

- учет особенностей как структуры сети, параметров каналов связи, так и характеристик передаваемого трафика;
- поддержка мультипотокности, т.е. модель описывает порядок маршрутизации не одного, а одновременно нескольких потоков с учетом их взаимного влияния;
- контроль за возможной перегрузкой элементов сети за счет выполнения условий сохранения потока в узлах сети и условий предотвращения перегрузки каналов связи.

В рамках базовой модели структура сети описывается с помощью взвешенного ориентированного графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество узлов (маршрутизаторов), а  $E$  –

множество дуг (каналов связи). Каждая дуга  $(i, j) \in E$  взвешивается параметром  $c_{i,j}$ , который характеризует пропускную способность моделируемого канала связи. Пусть  $S_k$  и  $D_k$  – узел-отправитель и узел-получатель  $k$ -го потока соответственно, а  $r_k$  – интенсивность  $k$ -го потока из множества  $K$ . Управляющей переменной служит величина  $x_{i,j}^k$ , которая характеризует долю  $k$ -го потока, передающегося по каналу связи  $(i, j) \in E$ . В соответствии с физикой решаемой задачи многопутевой маршрутизации на переменные  $x_{i,j}^k$  накладываются следующие ограничения:

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

В ходе решения маршрутной задачи необходимо обеспечить выполнение условий сохранения потока в каждом из узлов и сети в целом:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1, i = S_k - \text{для узла отправителя;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 0, i \neq S_k, D_k - \text{для транзитных узлов;} \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = -1, i = D_k - \text{для узла получателя} \end{cases} \quad (2)$$

Также должны выполняться условия предотвращения перегрузки каналов связи, а именно

$$\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i, j) \in E. \quad (3)$$

В ходе решения задачи маршрутизации пусть, для примера, минимизируется целевая функция вида:

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j}^k \cdot x_{i,j}^k, \quad (4)$$

где  $f_{i,j}^k$  – метрика канала связи между  $i$ -м и  $j$ -м узлами ТКС.

Таким образом, в рамках базовой потоковой модели (1)-(4) поиск множества оптимальных маршрутов сводится к задаче линейного программирования при минимизации целевой функции (4) с учетом ограничений (1)-(3).

## II. Условия реализации многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям

Рассмотрим случай, когда в сети необходимо реализовать многопутевую маршрутизацию по непересекающимся путям с возможностью регулировки числа используемых маршрутов, как это сделано, например, в работах [6, 9]. Как видно из рис. 1а, при многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям необходимо, чтобы выполнялось следующее предположение (гипотеза): в каждый транзит-

ный узел поток должен входить не более чем по одному каналу связи, и соответственно, выходить также не более чем по одному исходящему каналу. В соответствии с приведенной гипотезой в обозначениях базовой модели (1)-(4) для всех входных интерфейсов  $i$ -го транзитного узла должны выполняться следующие условия:

$$\sum_{j:(j,i) \in E} \sum_{\substack{l:(l,i) \in E, \\ l \neq j}} x_{j,i}^k x_{l,i}^k = 0, \quad (5)$$

а для всех выходных интерфейсов  $i$ -го транзитного узла сети должны быть справедливыми такие равенства:

$$\sum_{n:(i,n) \in E} \sum_{\substack{m:(i,m) \in E, \\ m \neq n}} x_{i,n}^k x_{i,m}^k = 0. \quad (6)$$

Выполнение нелинейных ограничений (5) и (6) гарантирует, что поток, проходящий через  $i$ -й транзитный узел, поступает не более чем от одного смежного узла и передается не более чем одному смежному узлу. Таким образом, происходит формирование множества непересекающихся путей, у которых общими являются только пара узлов отправитель и получатель. Ввиду нелинейности условий (5) и (6) оптимизационная задача, связанная с минимизацией выражения (4), уже будет относиться к классу задач нелинейного программирования.

Для обеспечения регулировки числа используемых непересекающихся путей при реализации многопутевой маршрутизации  $k$ -го потока обозначим через  $M_{ВП}^k$  верхнее пороговое значение количества непересекающихся путей, которое определяется степенью вершин, моделирующих узлы отправителя и получателя, т.е. количеством инцидентных этим вершинам дуг (каналов связи):

$$M_{ВП}^k = \min(d(S_k), d(D_k)), \quad (7)$$

где  $d(S_k)$  и  $d(D_k)$  – степени вершин (узлов) отправителя и получателя  $k$ -го потока соответственно.

Фактически используемое число непересекающихся путей  $M_{Ф}^k$  при маршрутизации  $k$ -го потока, применяя модель (1)-(4) и условия (5), (6), по аналогии с выражение (7) можно рассчитать таким образом:

$$M_{Ф}^k = \min \left( \sum_{j:(j,i) \in E} \lceil x_{i,j}^k \rceil, \sum_{n:(n,m) \in E} \lceil x_{n,m}^k \rceil \right) \text{ при } i = S_k, m = D_k, \quad (8)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  – операция округления числа к ближайшему большему целому;  $\sum_{j:(j,i) \in E} \lceil x_{i,j}^k \rceil$  – число инцидентных  $i$ -му узлу каналов связи, по которым  $k$ -й поток выходит из этого узла;  $\sum_{n:(n,m) \in E} \lceil x_{n,m}^k \rceil$  – число инцидентных  $m$ -му узлу каналов связи, по которым  $k$ -й поток входит в этот узел.

Величина  $M_{\Phi}^k$  может выступать как оцениваемый параметр, так и в качестве регулируемой величины, т.е. с ее помощью можно задавать минимальное, максимальное или определять заданное число используемых непересекающихся путей при многопутевой маршрутизации. Пределы изменения данной величины определяются по такому неравенству

$$1 \leq M_{\Phi}^k \leq M_{ВП}^k. \quad (9)$$

### III. Проверка работоспособности предложенной потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям

Проведем проверку работоспособности (адекватности) предложенной потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в ТКС с регулировкой числа используемых маршрутов. Для этого рассмотрим структуру сети, состоящую из двенадцати узлов и двадцати пяти каналов связи. При этом в качестве пары узлов отправитель-получатель выступали первый и двенадцатый узлы соответственно. Пропускная способность каждого из каналов связи, для примера, равнялась 100 пакетам в секунду (1/с).

Вначале проанализируем результат, получаемый при использовании базовой потоковой модели (1)-(4), когда метрика каналов связи равнялась единице ( $f_{i,j}^k = 1$ ). Пусть между парой узлов отправитель-получатель передавался поток пакетов интенсивностью 300 1/с. Результирующий порядок многопутевой маршрутизации, полученный на основе модели (1)-(4), представлен на рис. 2, где в разрыве того или иного канала связи показана интенсивность протекающего по нему потока.

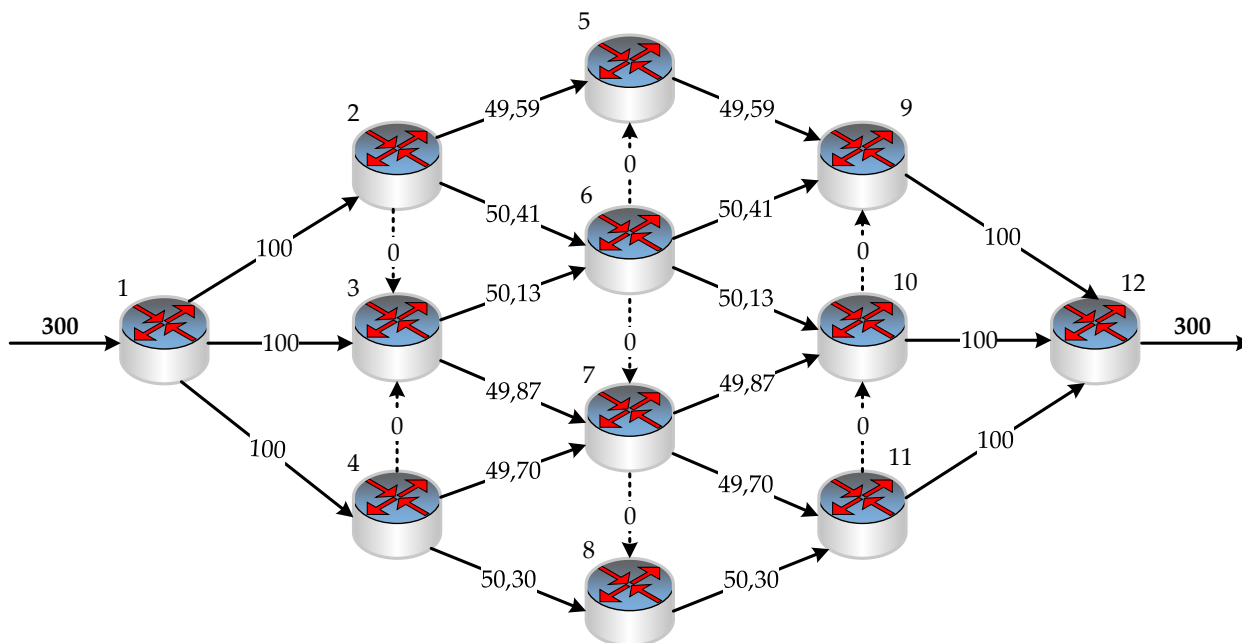


Рис. 2. Результат расчета множества путей с использованием базовой модели (1)-(4) при обслуживании потока интенсивностью 300 1/с

Анализ рис. 2 показал, что базовая модель (1)-(4) обеспечивает расчет множества пересекающихся как по узлам, так и по каналам связи маршрутов. Для удобства незадействованные в ходе маршрутизации каналы связи показаны на рис. 2 штриховой линией.

Далее проведем решение задачи многопутевой маршрутизации, но уже по непересекающимся путям, т.е. с учетом вновь сформулированных условий (5) и (6). Результат расчета при тех же исходных данных показан на рис. 3. Полученное множество маршрутов включает в себя следующие три ( $M_{\Phi}^k = 3$ ) непересекающиеся пути:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 9 \rightarrow 12$ ,  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 12$  и  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 12$ . По каждому из этих путей передается поток интенсивностью 100 1/с.

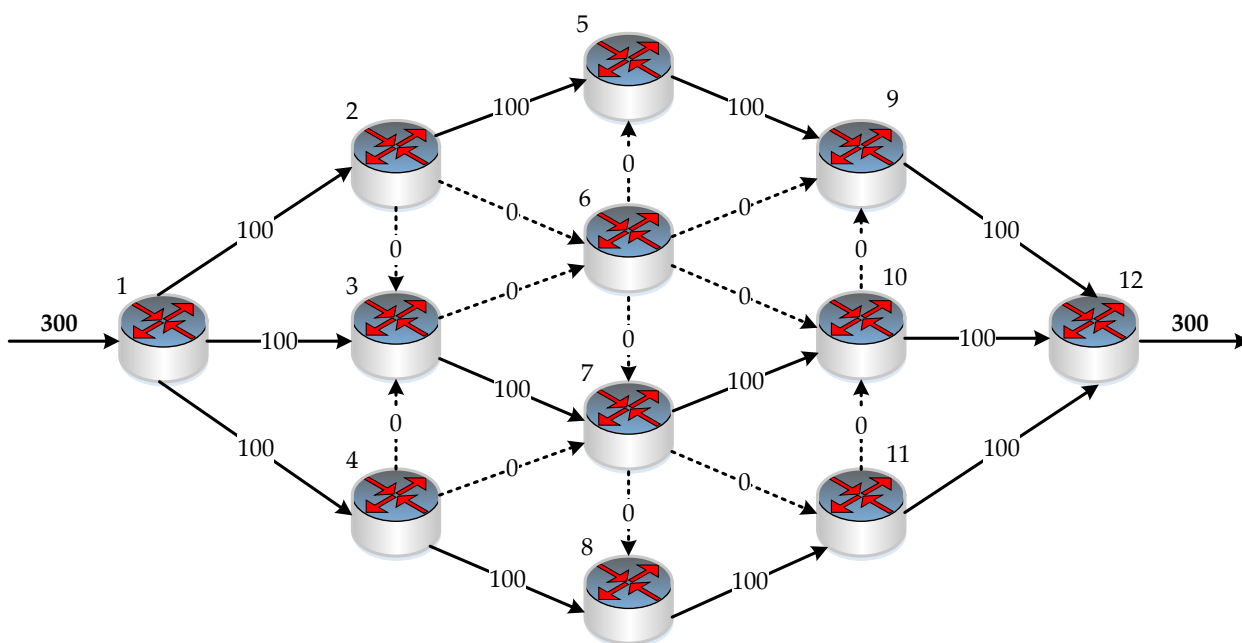


Рис. 3. Результат расчета множества путей с использованием условий маршрутизации по непересекающимся путям (5) и (6) при обслуживании потока интенсивностью 300 1/с

Изменим несколько исходные данные: пусть на вход в сеть поступает поток интенсивностью 100 1/с, а  $M_{\Phi}^k = 2$  при  $M_{ВП}^k = 3$ , т.е. условие (9) выполняется. Тогда использование модели (1)-(9) определит порядок маршрутизации потоков в ТКС, представленный на рис. 4. Пути  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 9 \rightarrow 12$  и  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 12$  также являются непересекающимися.

Таким образом, результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям с регулировкой числа используемых маршрутов, по которым можно судить в том числе и о ее адекватности.

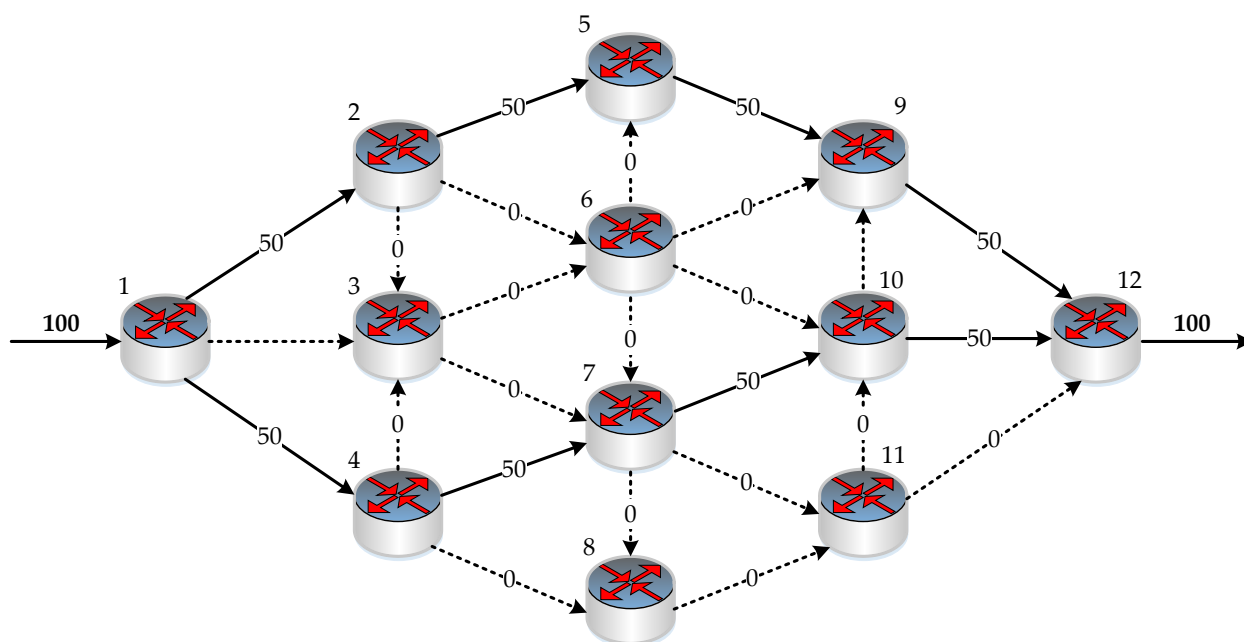


Рис. 4. Результат расчета множества путей с использованием условий (5) и (6) при обслуживании потока интенсивностью  $100 \text{ 1/c}$  ( $M_{\Phi}^k = 2$ )

## Выводы

В работе было предложено решение актуальной научной задачи, связанной с разработкой потоковой модели многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в ТКС с регулировкой числа используемых маршрутов. Предложенная модель является дальнейшим развитием известной модели многопутевой маршрутизации за счет введения в ее структуру нелинейных ограничений (5), (6) и (8). Это позволило получить искомый порядок многопутевой маршрутизации по непересекающимся путям в ходе решения задачи нелинейного программирования с целевой функцией (4), линейными ограничениями (1)-(3) и нелинейными условиями (5), (6) и (8). При этом использование условия (8) позволяет обеспечить расчет множества непересекающихся маршрутов, обладающего некоторыми важными свойствами относительно их необходимого количества. Это важно при формулировке и решении задач многопутевой маршрутизации, связанных с обеспечением заданного уровня качества обслуживания [2, 5] и (или) безопасности передаваемых данных [6-9, 11].

## Список литературы:

1. Vegesna S. IP Quality of Service // Cisco press, 2001. – 368 p.
2. Seok Y., Lee Y., Kim C., Choi Y. Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2001. – №3. – P. 348 – 353.



3. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
4. Поповский В.В., 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. – Т.4, вып.4. – С. 372-382.
5. Лемешко А.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12 – 29. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121\\_lemeshko\\_multipath.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf).
6. Lou W. SPREAD: Enhancing Data Confidentiality in Mobile Ad Hoc Networks / W. Lou, W. Liu, Y. Fang // INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE. – 2004. – Vol. 4. – PP. 2404 – 2413.
7. Lou W. SPREAD: Improving Network Security by Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks / W. Lou, W. Liu, Y. Zhang, Y. Fang // Wireless Networks. – 2009. – Vol. 15, Issue 3. – PP. 279 – 294.
8. Лемешко А.В. Модель безопасной маршрутизации с оптимальной балансировкой числа фрагментов передаваемого сообщения по непересекающимся маршрутам / А.В. Лемешко, А.С. Еременко // Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС-2015): Сб. науч. трудов Первой междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 27 мая 2015 г.– Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 96–99.
9. Alouneh S. A Multiple LSPs Approach to Secure Data in MPLS Networks / S. Alouneh, A. En-Nouaary, A. Agarwal // Journal of Networks. – 2007. – Vol. 2, Issue 4. – PP. 51 – 58.
10. Natarajan M. Graph Theory Algorithms for Mobile Ad Hoc Networks / M. Natarajan // Informatica – An International Journal of Computing and Informatics. – 2012. – Vol. 36. – PP. 185 – 200.
11. Alouneh S. A Novel Path Protection Scheme for MPLS Networks using Multi-path Routing / S. Alouneh, A. Agarwal, A. En-Nouaary // Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. – 2009. – Vol. 53, Issue 9. – PP. 1530 – 1545.
12. Suurballe J.W. Disjoint paths in a network / J.W. Suurballe // Networks. – 1974. – Vol. 4, Issue 2. – PP. 125 – 145.
13. Suurballe J.W. A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths / J.W. Suurballe, R.E. Tarjan // Networks. – 1984. – Vol. 14, Issue 2. – PP. 325 – 336.