

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ МНОГОПУТЕВОЙ
МАРШРУТИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ**

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗВ'ЯЗАНЬ ЗАДАЧ БАГАТОШЛЯХОВОЇ
МАРШРУТИЗАЦІЇ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SOLUTION OF THE PROBLEM MULTIPATH
ROUTING VARIOUS METHODS**

Аннотация. Приведены результаты сравнения использования методов многопутевой маршрутизации с поочередной загрузкой сетевых ресурсов, многопутевой маршрутизации Галлагера и альтернативного решения – узлового тензорного метода при решении задачи многопутевой маршрутизации трафика по двум критериям: значению среднего времени задержки пакетов и коэффициенту использования сети для различных архитектур телекоммуникационной сети. Разработаны практические рекомендации применения методов многопутевой маршрутизации в сетях следующего поколения NGN.

Анотація. Наведені результати порівняння використання методів багатошляхової маршрутизації з почерговим завантаженням мережних ресурсів, багатошляхової маршрутизації Галлагера та альтернативного розв'язання – вузлового тензорного методу при розв'язанні задачі багатошляхової маршрутизації трафіка за двома критеріями: значення середнього часу затримки пакетів і коефіцієнта використання мережі для різної архітектури телекомунікаційної мережі. Розроблені практичні рекомендації щодо використання методів багатошляхової маршрутизації в мережах наступного покоління NGN.

Summary. The results of comparing the use of multipath routing methods with sequential loading of network resources, multipath routing Gallagher and alternative solutions □ tensor nodal method for solving the problem of multipath routing traffic on two criteria: the value of the average packet delay and network utilization for various telecommunication network architectures. Practical recommendations application of multipath routing in next generation network NGN.

Современные телекоммуникационные сети развиваются в направлении внедрения сетей следующего поколения *NGN (Next Generation Network)*, основой которых является использование пакетных технологий для передачи различных видов трафика по единой сетевой инфраструктуре с обеспечением механизмов *QoS (Quality of Service)*. Вопросы гарантированного качества обслуживания *QoS* играют определяющую роль при внедрении сетей *NGN*, а выбор сетевой технологии для реализации *NGN* основывается на критерии наличия механизмов обеспечения заданного уровня *QoS*. Поэтому на этапе проектирования сетей *NGN* важной задачей, которая требует решения, является задача выбора метода маршрутизации сетевого трафика. Возможности использования различных методов маршрутизации трафика в сети позволяют за счет использования механизмов сбалансированной загрузки ресурсов сети, выбора оптимального маршрута прохождения трафика, использования процедур распределения загрузки сети и балансировки трафика обеспечить минимизацию времени задержки пакетов, значительно повысить использование доступных сетевых ресурсов [1...4].

До сих пор наиболее эффективным решением задач многопутевой маршрутизации (МПМ) трафика считается использование методов МПМ с поочередной загрузкой сетевых ресурсов и МПМ Галлагера [1...3]. Их использование позволяет учитывать все необходимые требования к многопутевой маршрутизации, такие как: поддержка характеристик качества обслуживания *QoS*, сбалансированная загрузка сетевых ресурсов и возможность получать эффективные решения в условиях дальнейшего увеличения количества сетевых объектов. Однако общим недостатком вышеуказанных методов является их низкая масштабируемость и невозможность обеспечения *QoS* одновременно по нескольким показателям. Поэтому в статье [5] найден альтернативный метод решения задач МПМ – узловой тензорный метод. Использование узлового тензорного метода, в отличие от рассмотренных ранее, позволяет обеспечить поддержку гарантированного качества

обслуживания QoS одновременно по нескольким показателям для каждого из маршрутов передачи трафика; получить минимальное значение среднего времени задержки пакетов, причем одинаковое для всех маршрутов передачи трафика; достичь высокой масштабируемости сети [5].

Целью данной статьи является сравнительный анализ эффективности решений задач многопутевой маршрутизации трафика по критерию минимального среднего времени задержки пакетов и критерию использования доступных сетевых ресурсов с помощью узлового тензорного метода, метода МПМ с поочередной загрузкой сетевых ресурсов и метода МПМ Галлагера с разработкой рекомендаций по их применению.

Сравним различные методы маршрутизации по двум наиболее важным критериям их оценки: значению среднего времени задержки пакетов τ_{cp} для каждого из маршрутов передачи трафика и коэффициента использования сети $k_{исп}$. Первый критерий позволит оценить эффективность решения задач маршрутизации определенным методом с точки зрения обеспечения гарантированного качества обслуживания QoS , второй – с точки зрения сбалансированной загрузки доступных сетевых ресурсов [1...6].

Рассмотрим различные структуры сети, которые отличаются размерностью и связностью сетевых узлов, которые показаны на рис. 1, а, б, в.

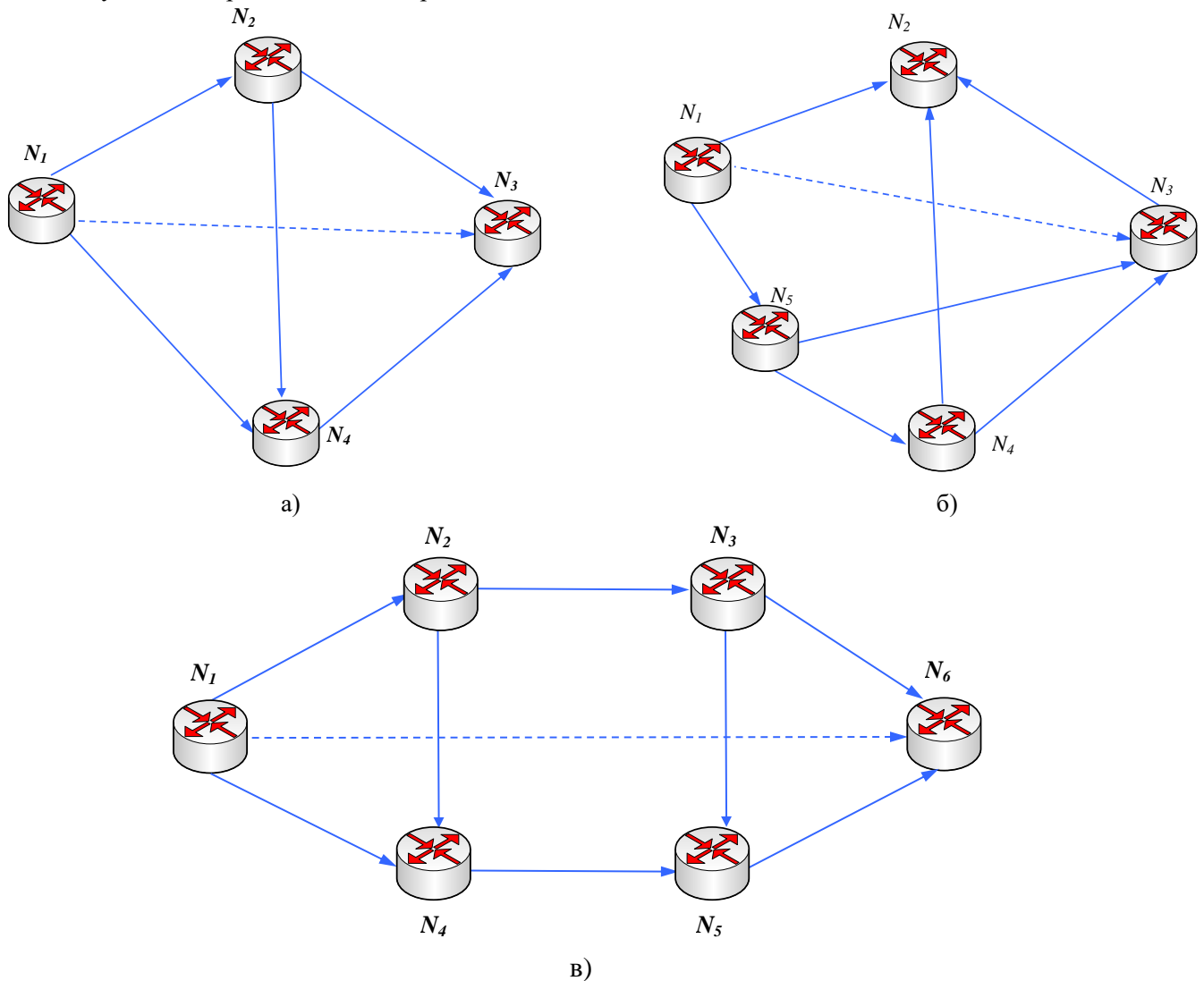


Рисунок 1 – Исследуемые структуры ТКС

Применим методы МПМ с поочередной загрузкой сетевых ресурсов, МПМ Галлагера, узловой тензорный метод при условии заданных одинаковых исходных данных значений пропускных способностей трактов сети и внешних интенсивностей нагрузок, поступающих в сеть. Определим, при каком методе многопутевой маршрутизации возможно получить минимальное значение среднего

времени задержки пакетов τ_{cp} для каждого из маршрутов передачи трафика в зависимости от загрузки этих маршрутов $\rho_{загр}$ при сбалансированном использовании доступных сетевых ресурсов. Полученный анализ позволит дать практические рекомендации о целесообразности применения того или иного рассматриваемого метода для различных сетей.

Рассмотрим фрагменты различных структур телекоммуникационной сети (ТКС). Пусть заданы пропускные способности c_i i -х трактов сети, $i = \overline{1, n}$, где n – количество трактов, причем $c_i \in [70; 200]$ (тыс. пак/с) и значения интенсивности трафика $l_{вх}$, поступающего на входящий узел N_1 , причем $l_{вх} \in [10; 255]$ (тыс. пак/с). Для структур ТКС, показанных на рис. 1,а (количество узлов $m = 4$, количество трактов $n = 6$), для рис. 1,б (количество узлов $m = 5$, количество трактов $n = 8$), а для рис. 1,в (количество узлов $m = 6$, количество трактов $n = 9$).

Определим среднее время задержки пакетов τ_i в i -м тракте сети, $i = \overline{1, n}$, при условии, что рассматриваемый тракт представлен СМО М/М/1, используя формулу [7]:

$$\tau_i = \frac{1}{c_i - l_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где τ_i – среднее время задержки в i -м тракте сети; c_i – пропускная способность i -го тракта сети; l_i – интенсивность трафика в i -м тракте сети, $i = \overline{1, n}$.

Найдем зависимость среднего времени задержки пакетов τ_i в i -м тракте сети от коэффициента загрузки сети ρ_i в i -м тракте сети, используя формулу [7]:

$$\rho_i = \frac{l_i}{c_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где ρ_i – коэффициент загрузки в i -ом тракте сети; l_i – интенсивность трафика в i -м тракте сети; c_i – пропускная способность i -го тракта сети, причем $i = \overline{1, n}$.

Тогда, подставляя формулу (1) в (2), после несложных преобразований, получим:

$$\tau_i = \frac{1}{c_i(1 - \rho_i)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Рассматривая среднее время задержки в i -м тракте сети, как функцию, зависящую от коэффициента загрузки в i -м тракте сети, т.е. $\tau_i = \tau_i(\rho_i)$, $i = \overline{1, n}$ и учитывая (3), можно сказать, что $\tau_i = \tau_i(\rho_i)$ является возрастающей функцией, т.е. с возрастанием коэффициента загрузки сети в i -м тракте, увеличивается среднее время задержки в i -м тракте сети.

Действительно, рассмотренные произвольные ρ_i^1 и ρ_i^2 из заданной области определения такие, что $\rho_i^1 < \rho_i^2$, имеем:

$$1 - \rho_i^1 > 1 - \rho_i^2. \quad (4)$$

Так как пропускная способность i -го тракта сети положительная, т.е. $c_i > 0$ для i -го тракта сети, то учитывая (4), имеем:

$$c_i(1 - \rho_i^1) > c_i(1 - \rho_i^2),$$

т. е.

$$\frac{1}{c_i(1 - \rho_i^1)} < \frac{1}{c_i(1 - \rho_i^2)}. \quad (5)$$

Последнее означает, что $\tau_i^1 < \tau_i^2$, т.е. что функция $\tau_i = \tau_i(\rho_i)$ возрастающая функция в области определения загрузки.

Не умоляя общности, обозначим через $\rho_{\text{загр}}$ – коэффициент загрузки маршрута передачи трафика, который определяется суммой загрузок ρ_i i -х трактов сети, образующих этот маршрут, т.е.

$\rho_{\text{загр}} = \sum_{i=1}^n \rho_i$, а через $\tau_{\text{ср}}$ – среднее время задержки пакетов в маршруте передачи трафика, которое

является суммой значений задержек τ_i в каждом i -м тракте сети, $i = \overline{1, n}$, т.е. $\tau_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \tau_i$.

В теории телетрафика, согласно [7], при исследовании коэффициента загрузки сети $\rho_{\text{загр}}$ обычно рассматривают три области: область невысокой загрузки – $\rho_{\text{загр}} \in [0; 0,4]$; область средней загрузки – $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,7]$ и область высокой загрузки сети – $\rho_{\text{загр}} \in [0,7; 1,0]$. Рассмотрим эти области.

Получим графики зависимости $\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{ср}}(\rho_{\text{загр}})$ среднего времени задержки пакетов $\tau_{\text{ср}}$ от коэффициента загрузки $\rho_{\text{загр}}$ сети (см. рис. 2) для различных методов маршрутизации заданной структуры сети, показанной на рис. 1, а (при $m = 4$ и $n = 6$), для сети, показанной на рис. 1,б (при $m = 5$ и $n = 8$) и для сети, показанной на рис. 1,в (при $m = 6$ и $n = 9$).

При исследовании сети (см. рис. 2, а) с небольшим количеством трактов и узлов ($m = 4, n = 6$) для области невысоких загрузок $\rho_{\text{загр}} \in [0; 0,4]$ меньшее время средней задержки пакетов $\tau_{\text{ср}}$ обеспечивает метод МПМ Галлагера (линия 2) и узловой тензорный метод (линия 2), при этом значение среднего времени задержки составляет $\tau_{\text{ср}} \approx 10$ мс. Для областей средней загрузки: $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,7]$ и высокой загрузки: $\rho_{\text{загр}} \in [0,7; 1,0]$ рационально использовать метод МПМ Галлагера (линия 2), который обеспечивает лучшие показатели $\tau_{\text{ср}}$ в среднем 1,4...4,6 раза по сравнению с узловым тензорным методом (линия 3).

Для метода многопутевой маршрутизации Галлагера среднее время задержки для области средней загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,7]$ составляет $\tau_{\text{ср}} \in [10; 25]$ мс, а для узлового тензорного метода – $\tau_{\text{ср}} \in [20; 100]$ мс.

Наихудший результат показывает метод МПМ с поочередной загрузкой (линия 1) с максимальным значением $\tau_{\text{ср}} \approx 200$ мс. Для области высокой загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0,7; 1,0]$ метод МПМ Галлагера показывает ступенчатое увеличение времени задержки $\tau_{\text{ср}} \in [25; 50]$ мс, уже при $\rho_{\text{загр}} = 0,95$ составляет $\tau_{\text{ср}} \approx 140$ мс. Узловой тензорный метод позволяет обеспечить $\tau_{\text{ср}} \in [100; 200]$ мс.

Таким образом, полученные результаты для сети, соответствующей рис. 1,а, показывают целесообразность использования метода МПМ Галлагера и в некоторых случаях – узлового тензорного метода. В связи с тем, что использование метода МПМ Галлагера более затруднительно с точки зрения вычислительного аспекта, для практической реализации рекомендуется использовать узловой тензорный метод. При этом, при решении задач МПМ с помощью узлового тензорного метода балансировка трафика выполняется по множеству доступных маршрутов с равными значениями среднего времени задержки пакетов, то можно утверждать, что его использование позволит получить значения эффективного распределения ресурсов с наименьшими значениями задержки.

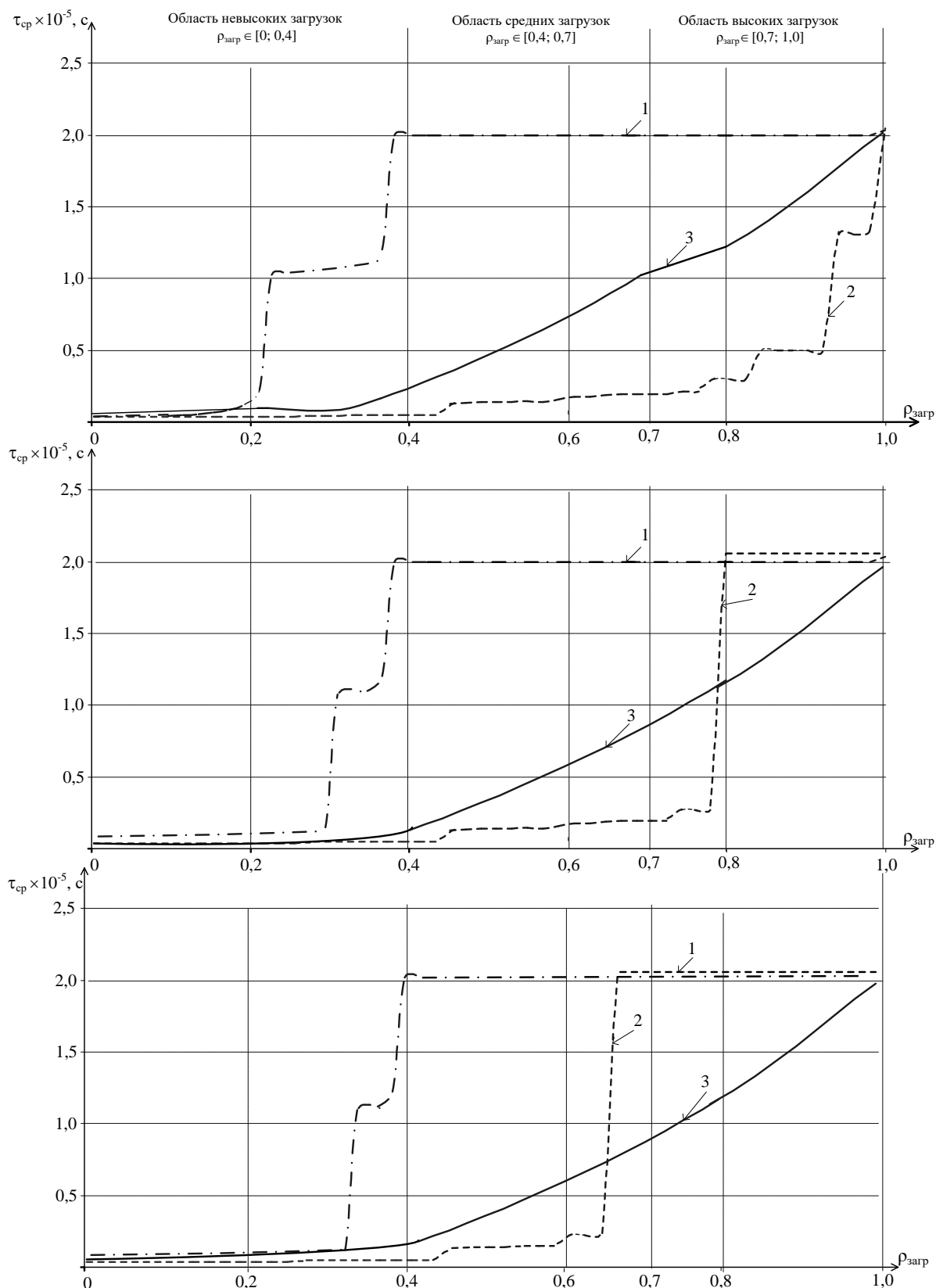


Рисунок 2 – График зависимости среднего времени задержки пакетов $\tau_{cp} = \tau_{cp}(\rho_{zagr})$ от коэффициента загрузки ρ_{zagr} для различных методов маршрутизации: МПМ с поочередной загрузкой путей (линия 1); МПМ Галлагера (линия 2); узлового тензорного метода (линия 3) для структуры сети, соответствующей рис. 1,а,б,в

При исследовании сети (рис. 1,б) ($m = 5, n = 8$) в области невысокой загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0; 0,4]$ рекомендуется использовать метод МПМ Галлагера (линия 2) и узловой тензорный метод (линия 3). Полученные значения среднего времени задержки пакетов $\tau_{\text{ср}}$ для этих методов практически одинаковы $\tau_{\text{ср}} \approx 10$ мс. При этом метод МПМ с поочередной загрузкой путей (линия 1) показывает максимальные значения $\tau_{\text{ср}} \approx 200$ мс начиная с $\rho_{\text{загр}} = 0,3$. На промежутке $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,7]$ предпочтительнее использовать метод МПМ Галлагера (линия 2), так как среднее время задержки в рассматриваемой области составляет $\tau_{\text{ср}} \in [10; 25]$ мс и обеспечивает лучшие показатели $\tau_{\text{ср}}$ в среднем 2,5...3,8 раза. Использование узлового тензорного метода (линия 3) позволяет получить значения $\tau_{\text{ср}} \in [10; 80]$ мс, а метод МПМ (линия 1) показывает максимальное значение задержки $\tau_{\text{ср}} \approx 200$ мс. Для области высокой загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0,7; 1,0]$ можно отметить преимущество использования узлового тензорного метода (линия 3), так как в рассматриваемой области среднее время задержки пакетов составляет $\tau_{\text{ср}} \in [80; 200]$ мс.

При исследовании сети (рис. 1,в) ($m = 6, n = 9$) в области невысокой загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0; 0,4]$ целесообразно использовать метод МПМ Галлагера (линия 2) и узловой тензорный метод (линия 3). Полученные значения времени задержки $\tau_{\text{ср}}$ для этих методов практически одинаковы $\tau_{\text{ср}} \approx 10$ мс. При этом метод МПМ с поочередной загрузкой путей (линия 1) начиная с $\rho_{\text{загр}} \approx 0,35$ стремительно возрастает до максимального значения 200 мс. В области средней загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,7]$ использование метода МПМ Галлагера (линия 2) целесообразно для $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,65]$. При этом значение среднего времени задержки составляет $\tau_{\text{ср}} \in [10; 20]$ мс и обеспечивает лучшие показатели $\tau_{\text{ср}}$ в среднем 2,8 раза по отношению к тензорному методу. Использование же узлового тензорного метода (линия 3) целесообразно для $\rho_{\text{загр}} \in [0,65; 0,7]$, при этом $\tau_{\text{ср}} \in [70; 90]$ мс. Для области высокой загрузки $\rho_{\text{загр}} \in [0,7; 1,0]$ можно отметить преимущество использования узлового тензорного метода (линия 3), при этом $\tau_{\text{ср}} \in [90; 200]$ мс.

Полученные результаты для структуры сети (рис. 1,в) позволяют сделать вывод, что использование узлового тензорного метода целесообразно для сети, которая имеет значительное количество узлов и связывающих их трактов, которая находится в предельно нагруженном состоянии.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что использование предложенного узлового тензорного метода целесообразно для областей средних $\rho_{\text{загр}} \in [0,4; 0,7]$ и высоких загрузок $\rho_{\text{загр}} \in [0,7; 1,0]$, в которых обеспечиваются меньшие значения среднего времени задержки пакетов $\tau_{\text{ср}}$ по сравнению с другими методами МПМ в области средней загрузки 1,8...4,6 раза, а для области высокой загрузки 1,7...4,2 раза. При этом, чем выше количество узлов и трактов рассматриваемой структуры сети, тем значительнее уменьшение среднего времени задержки пакетов $\tau_{\text{ср}}$ при использовании узлового тензорного метода для областей высоких загрузок, которые чаще всего рассматриваются на практике.

При решении задач маршрутизации трафика важно не только достичь минимального времени задержки пакетов $\tau_{\text{ср}}$ вдоль заданного маршрута передачи трафика, но и повысить производительность сети за счет рационального использования доступных сетевых ресурсов. Для этого используется коэффициент использования $k_{\text{исп}}$, позволяющий оценивать эффективность использования сетевых ресурсов. Согласно [7], $k_{\text{исп}}$ определяется выражением:

$$k_{\text{исп}} = \frac{l_{\text{вх}}}{c}, \quad (6)$$

где $k_{исп}$ – коэффициент использования сети; $I_{вх}$ – интенсивность внешнего трафика на входе сети; $c = \sum_{i=1}^n c_i$ – суммарная пропускная способность всех трактов сети; n – количество трактов сети.

Используя формулу (6), получим графики $k_{исп} = k_{исп}(\rho_{загр})$ (см. рис. 3) для различных методов маршрутизации сети (рис. 1,а,б,в). Полученная зависимость $k_{исп}$ от коэффициента загрузки сети $\rho_{загр}$ показывает целесообразность использования узлового тензорного метода на всей области загрузки сети $\rho_{загр} \in [0; 1,0]$.

При этом, для структуры сети (рис. 1,а) при $\rho_{загр} = 0,8$ узловой тензорный метод обеспечивает значение $k_{исп} \approx 0,67$, а метод МПМ с поочередной загрузкой путей и МПМ Галлагера значение $k_{исп} \approx 0,62$. Для сети (рис. 1,б), также получено преимущество использования тензорного метода для $\rho_{загр} = 0,8$, узловой тензорный метод обеспечивает значение $k_{исп} \approx 0,72$, а метод МПМ с поочередной загрузкой путей значение $k_{исп} \approx 0,52$, метод МПМ Галлагера показывает значение $k_{исп} \approx 0,6$.

Структура сети, (рис. 1,в) показывает преимущество использования тензорного метода по сравнению с другими методами на всей области загрузки сети $\rho_{загр} \in [0; 1,0]$. При этом, для $\rho_{загр} = 0,8$ узловой тензорный метод (линия 3) обеспечивает значение $k_{исп} \approx 0,72$, метод МПМ с поочередной загрузкой путей (линия 1) значение $k_{исп} \approx 0,56$, метод МПМ Галлагера (линия 2) показывает значение $k_{исп} \approx 0,5$.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что с точки зрения рационального использования доступных сетевых ресурсов использование предложенного узлового тензорного метода целесообразно для всей области загрузки сети $\rho_{загр} \in [0; 1,0]$. При этом, максимально эффективное использование ресурсов сети достигается за счет особенностей структуры рассматриваемых сетей (рис. 1,а,б,в), когда между рассматриваемыми узлами существует несколько путей доставки трафика.

Согласно полученным результатам можно сказать о преимуществе использования узлового тензорного метода для решения задач многопутевой маршрутизации, который позволяет достичь наилучших, по сравнению с другими методами значений среднего времени задержки пакетов при прочих равных условиях: структуре сети, пропускной способности трактов сети, загруженности сети и интенсивности внешнего поступающего трафика.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Использование узлового тензорного метода для эффективного решения задач многопутевой маршрутизации в отличие от метода МПМ с поочередной загрузкой путей и метода МПМ Галлагера позволяет обеспечить качество обслуживания QoS одновременно по нескольким показателям для каждого из маршрутов передачи трафика, получить минимальное значение среднего времени задержки пакетов, причем одинаковое для всех маршрутов передачи трафика и достичь высокой масштабируемости сети.

2. Согласно критерию минимального значения среднего времени задержки пакетов $\tau_{ср}$ для каждого из маршрутов передачи трафика получено:

– для структуры сети (рис. 1,а) с небольшим количеством трактов и узлов ($m = 4, n = 6$) для области невысоких загрузок $\rho_{загр} \in [0; 0,4]$, целесообразно использование узлового тензорного метода и метода МПМ Галлагера. При этом значение минимального среднего времени задержки пакетов равно $\tau_{ср} \approx 10$ мс;

– для структуры сети (рис. 1,в) с бóльшим количеством трактов и узлов ($m = 6, n = 9$) для областей средних $\rho_{загр} \in [0,4; 0,7]$ и высоких загрузок $\rho_{загр} \in [0,7; 1,0]$ целесообразно использование узлового тензорного метода. При этом получены меньшие значения среднего времени задержки пакетов $\tau_{ср}$ по сравнению с другими методами в области средней загрузки 1,8...4,6 раза, а для области высокой загрузки 1,7...4,2 раза.

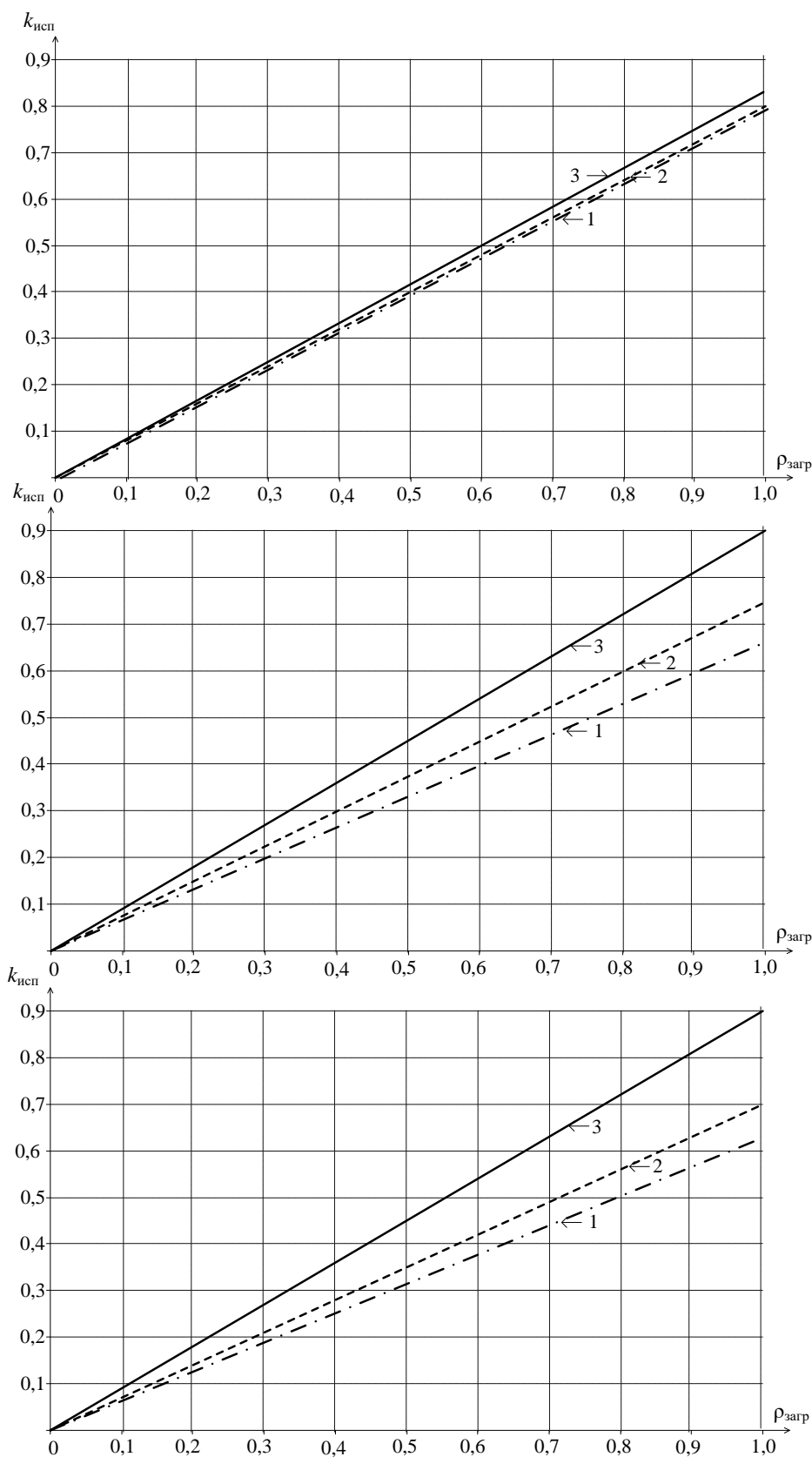


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента использования сети $k_{исп} = k_{исп}(\rho_{загр})$ от коэффициента загрузки сети $\rho_{загр}$ для различных методов маршрутизации: МПМ с поочередной загрузкой путей (линия 1); МПМ Галлагера (линия 2); узлового тензорного метода (линия 3) структуры сети, соответствующей рис. 1, а,б,в

3. Согласно критерию максимального значения коэффициента использования $k_{исп}$ для каждого из маршрутов:

– для структуры сети (рис. 1,а) с небольшим количеством трактов и узлов позволяет при $\rho_{загр} = 1$ достичь значения $k_{исп} \approx 0,82$, а для структуры сети (рис. 1,в) с большим количеством трактов при $\rho_{загр} = 1$ достичь значения $k_{исп} \approx 0,9$.

4. Проведенные исследования позволяют указать область использования предложенного узлового тензорного метода для решения задач многопутевой маршрутизации трафика. Это сети, которые имеют структурное построение близкое к полносвязному с бóльшим количеством сетевых узлов и бóльшей связности, т.е. более чем 4...6 путей доставки трафика между сетевыми узлами, функционирующие в области высоких загрузок.

Литература

1. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем / Вишневский В.М. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
2. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / Остерлох Х. – СПб.: ВHV-СПб., 2002. – 512 с.
3. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / [В.В. Поповський, С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник та ін.]; за заг. ред. В.В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
4. Теория сетей связи: [учебник для вузов связи] / [Рогинский В. Н., Харкевич А.Д., Шнепс М.А. и др.]; под ред. В.Н. Рогинского. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
5. Стрелковская И.В. Использование тензорного метода при расчете ТКС, представленной узловой сетью / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Электронное научное специализированное издание // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – <http://pt.journal.kh.ua>
6. Лемешко О.В. Результаты порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах / Лемешко О.В., Дробот О.А., Симоненко Д.В. / Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2007. – Вип. 1(13). – С. 66-69.
7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Клейнрок Л.; [под ред. И.И. Грушко; пер. с англ.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.