

УДК 621.391

# ПОВЫШЕНИЕ МАСШТАБИРУЕМОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОВЕРЛЕЙНЫХ СЕТЕЙ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#),

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники



[О.А. ДРОБОТ](#),

[Ю.Н. ДОБРЫШКИН](#)

Харьковский университет  
Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

*Представлено результати дослідження методу управління трафіком для забезпечення гарантованої якості обслуговування. Для підвищення масштабованості рішень використано оверлейні мережі. Результати отримано з використанням пакету імітаційного моделювання TOTEM.*

*The research results of traffic management method to ensure quality of service to presented. To improve the scalability of the overlay network used. Results obtained using the simulation package TOTEM.*

*Представлены результаты исследования метода управления трафиком для обеспечения гарантированного качества обслуживания. Для повышения масштабируемости решений использованы оверлейные сети. Результаты получены с использованием пакета имитационного моделирования TOTEM.*

## Введение

На сегодняшний день качество обслуживания (Quality of Service, QoS) в территориально-распределённых мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) во многом определяется перечнем поддерживаемых средств управления трафиком – маршрутизации, резервирования ресурсов, классификации и маркировки пакетов, профилирования трафика и др. С введением новых услуг и повышением требований к качеству обслуживания соответствующие модификации должны коснуться в т.ч. протоколов и механизмов управления трафиком в ТКС. Все острее стоит проблема обеспечения гарантий качества обслуживания одновременно по нескольким показателям в условиях согласованного управления разнотипными сетевыми ресурсами (канальными, буферными ресурсами, трафиком) при реализации многопутевых и динамических стратегий маршрутизации.

Как показал проведенный анализ [1-3], серьезным сдерживающим фактором в успешной реализации на практике ключевых концепций управления трафиком (Traffic Engineering (TE), MultiPath Routing, QoS-Based Routing, Constrained-Based Routing), является несовершенство положенных в их основу математических моделей и методов. Все попытки обеспечить согласованное решение отдельных задач управления трафиком, как правило, наталкиваются на проблему масштабируемости решений, под которой понимается свойство сети сохранять эффективность своего функционирования в заданных пределах при росте территориальной распределенности ТКС, увеличении числа контролируемых показателей QoS, количества обслу-

живаемых трафиков и т.д. Проблемы с масштабируемостью решений, как правило, сказываются на росте объемов циркулируемой в сети служебной информации, повышении сложности вычислительной реализации того или иного метода (модели, протокола) управления трафиком.

В ряде важных случаев [4-6] выходом из создавшейся ситуации является использование иерархических (иерархическо-координационных) решений, способствующих повышению масштабируемости управления трафиком в территориально-распределенных ТКС. Однако и в рамках автономных систем (для IP-сетей) или кластеров (в АТМ-сетях) проблема масштабируемости может сохранить свою актуальность, особенно при обеспечении *гарантий* качества обслуживания, требующего, в частности, и резервирования сетевых ресурсов. В этом случае основная трудность заключается в том, что многопутевая маршрутизация, с одной стороны, способствует обеспечению более сбалансированной загруженности ТКС, но с другой, затрудняет решение задач распределения и резервирования канального ресурса (пропускной способности каналов связи) с поддержкой QoS. В этой связи в работе предлагается подход, основанный на расчете и использовании так называемых оверлейных сетей, которые определяли бы вероятный граф решения задач многопутевой маршрутизации (МПМ), на котором решения задач распределения и резервирования пропускной способности каналов связи обладали бы большей масштабируемостью.

## **I. Модель управления трафиком с обеспечением гарантированного качества обслуживания**

В работе [7] была предложена комплексная модель управления трафиком с обеспечением гарантированного качества обслуживания, в рамках которой реализуется требование мультисервисности за счет поддержки множества служб, минимизируется стоимость использования канальных ресурсов и обеспечивается согласованное решение задач МПМ, динамического распределения канальных ресурсов и гарантированного качества обслуживания по временным, скоростным показателям и показателям надежности. Данная модель является дальнейшим развитием модели, предложенной в работе [8].

Основу модели составляют ряд условий. Прежде всего, это условие сохранения потока для трафиков  $\theta$ -й службы, которое может быть представлено в следующем виде:

$$\gamma_{ij}^{(\theta)} = r_{ij}^{(\theta)} + \sum_{s \in M_i} \gamma_{sj}^{(\theta)} \phi_{ji}^{s(\theta)}, \quad \sum_{j \in M_i} \gamma_{ij}^{(\theta)} \phi_{js}^{i(\theta)} = \lambda_{is}^{(\theta)}, \quad (1)$$

$$\phi_{js}^{i(\theta)} = \begin{cases} 0, & \text{если } i = j; \\ \geq 0, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \quad \sum_{s \in M_i} \phi_{js}^{i(\theta)} = 1, \quad (2)$$

где  $\gamma_{ij}^{(\theta)}$  – интенсивность трафика  $\theta$ -й службы в  $i$ -м узле, определяемая как сумма входного потока и потока, поступающего на  $i$ -й узел от смежных узлов для  $j$ -го узла;  $\phi_{js}^{i(\theta)}$  – маршрутная переменная, характеризующая долю потока  $\gamma_{ij}^{(\theta)}$ , протекающего

из  $i$ -го узла по тракту  $(i, s)$ ;  $r_{ij}^{(\theta)}$  – интенсивность входного трафика  $\theta$ -й службы, поступающего в сеть через  $i$ -й узел и адресованного  $j$ -му узлу;  $\lambda_{ij}^{(\theta)}$  – интенсивность трафика  $\theta$ -й службы в тракте  $(i, j)$ ;  $M_i$  – множество узлов, смежных  $i$ -му узлу.

Выполнение условия сохранения потока для трафиков  $\theta$ -й службы (1) с одновременным ограничением на маршрутные переменные (2) дает возможность реализовать требование, связанное с реализацией МПМ и обеспечением сбалансированной загрузки ТКС. Описать динамический характер распределения канальных ресурсов можно, дополнив условия отсутствия перегрузки каналов связи ограничением на количество используемых канальных ресурсов:

$$0 \leq \lambda_{is}^{(\theta)} \leq \varphi_{ij}^{(\theta)}, \quad (3)$$

$$\varphi_{ij} \beta_{ij}^{(\theta)} = \varphi_{ij}^{(\theta)} \quad (0 \leq \beta_{ij}^{(\theta)} \leq 1), \quad (4)$$

$$\sum_{\theta=1}^{\Theta} \varphi_{ij}^{(\theta)} \leq \varphi_{ij} \quad \text{или} \quad \sum_{\theta=1}^{\Theta} \beta_{ij}^{(\theta)} \leq 1, \quad (5)$$

где  $\beta_{ij}^{(\theta)}$  – доля выделенного канального ресурса для трафика  $\theta$ -й службы в канале  $(i, j)$ ;  $\varphi_{ij}^{(\theta)}$  – выделенный объем канальных ресурсов для трафиков  $\theta$ -й службы в канале  $(i, j)$ ;  $\varphi_{ij}$  – пропускная способность канала  $(i, j)$ .

Дополнительная группа ограничений, связанная с формулировкой достаточных условий обеспечения сквозного (end-to-end) QoS, в общем случае имеет вид:

$$\tau^{(\theta)} \leq \tau_{\text{трб}}^{(\theta)}; \quad \sigma^{(\theta)} \leq \sigma_{\text{трб}}^{(\theta)}; \quad p_{\text{трб}}^{(\theta)} \leq p^{(\theta)}, \quad (6)$$

где  $\tau_{\text{трб}}^{(\theta)}$ ,  $\sigma_{\text{трб}}^{(\theta)}$ ,  $p_{\text{трб}}^{(\theta)}$  – требуемые значения выбранных показателей QoS: соответственно средней задержки ( $\tau^{(\theta)}$ ), джиттера ( $\sigma^{(\theta)}$ ) и вероятности своевременной доставки пакетов ( $p^{(\theta)}$ ) трафиков  $\theta$ -й службы. В работе [7] с помощью тензорного анализа сетей эти общие условия (6) представлены аналитическими выражениями, т.е. в виде зависимости численных значений того или иного показателя QoS от структурных и функциональных параметров ТКС в условиях реализации многопутевой стратегии маршрутизации. Для минимизации объема используемых канальных ресурсов при обеспечении QoS в качестве критерия оптимальности получаемых решений использован стоимостной критерий:

$$D = \min_{\lambda, \varphi} \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \alpha_{ij}^{(\theta)} \varphi_{ij}^{(\theta)}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{ij}^{(\theta)}$  – условная стоимость использования (резервирования) единицы канального ресурса для трафиков  $\theta$ -й службы в канале  $(i, j)$ , т.е. фактически  $\alpha_{ij}^{(\theta)}$  является метрикой данного канала.

## II. Анализ решений по управлению трафиком в рамках рассмотренной модели

Стоит учесть, что при расчете потоков и распределении пропускных способностей каналов связи в рамках данной модели (1)-(7) обеспечивался расчет множества путей, вдоль которых обеспечивались бы гарантии качества обслуживания одновременно по нескольким показателям QoS. При этом, как отмечено в работе [9], использование линейной целевой функции в ходе управления трафиком позволяет реализовать многопутевую маршрутизацию с последовательным включением путей, которая с практической точки зрения является более экономной при технологической реализации, чем маршрутизация по всему множеству всех доступных маршрутов. Причем каждый последующий маршрут «включался», когда уже используемое множество путей не обеспечивало заданного уровня качества обслуживания.

В этой связи назовем множество рассчитанных маршрутов при заданных требованиях к качеству обслуживания графом решений, который являлся ориентированным. Вершины и дуги графа решений составляли узлы и каналы сети, входящие в рассчитанное множество рассчитанных маршрутов. В качестве примера рассмотрим сеть, структура которой представлена на рис. 1, а в разрывах каналов связи указаны их пропускные способности (Мбит/с).

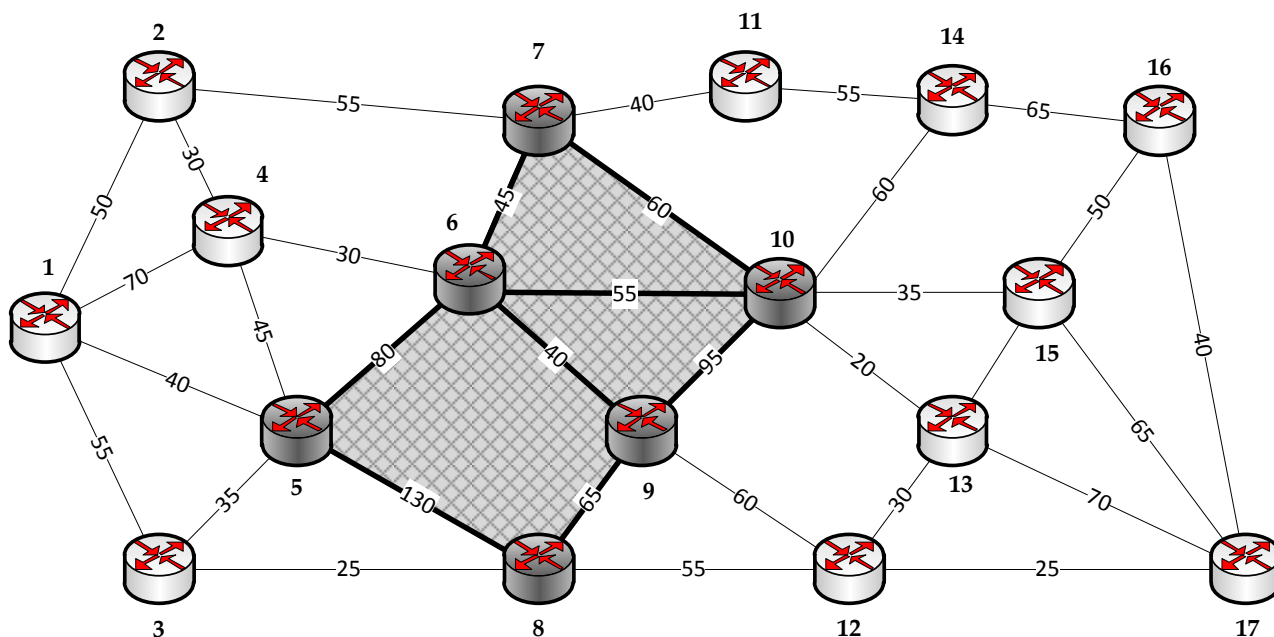


Рис. 1. Структура ТКС и граф решений задачи управления трафиком интенсивности 150 Мбит/с

При маршрутизации трафика интенсивности 150 Мбит/с от пятого узла к десятому могут использоваться узлы 5, 6, 7, 8, 9, 10, а также соединяющие их каналы связи. Причем по пути 5-6-7-10 маршрутизировался трафик интенсивности 45 Мбит/с; по пути 5-6-10 – 35 Мбит/с; по пути 5-8-9-6-10 – 20 Мбит/с; по пути 5-8-9-10 –

45 Мбит/с. Таким образом, в граф решений входят вершины (узлы сети) 5÷10 и соединяющие их дуги (каналы связи).

Граф решений задачи управления трафиком во многом определяется уровнем требований к качеству обслуживания. Так, например, при увеличении интенсивности трафика до 200 Мбит/с в дополнение к ранее полученному графу решений (рис. 1) добавится путь 5-8-12-9-10 (рис. 2). Такая же ситуация наблюдается и при ужесточении других показателей качества обслуживания – средней задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов и др.

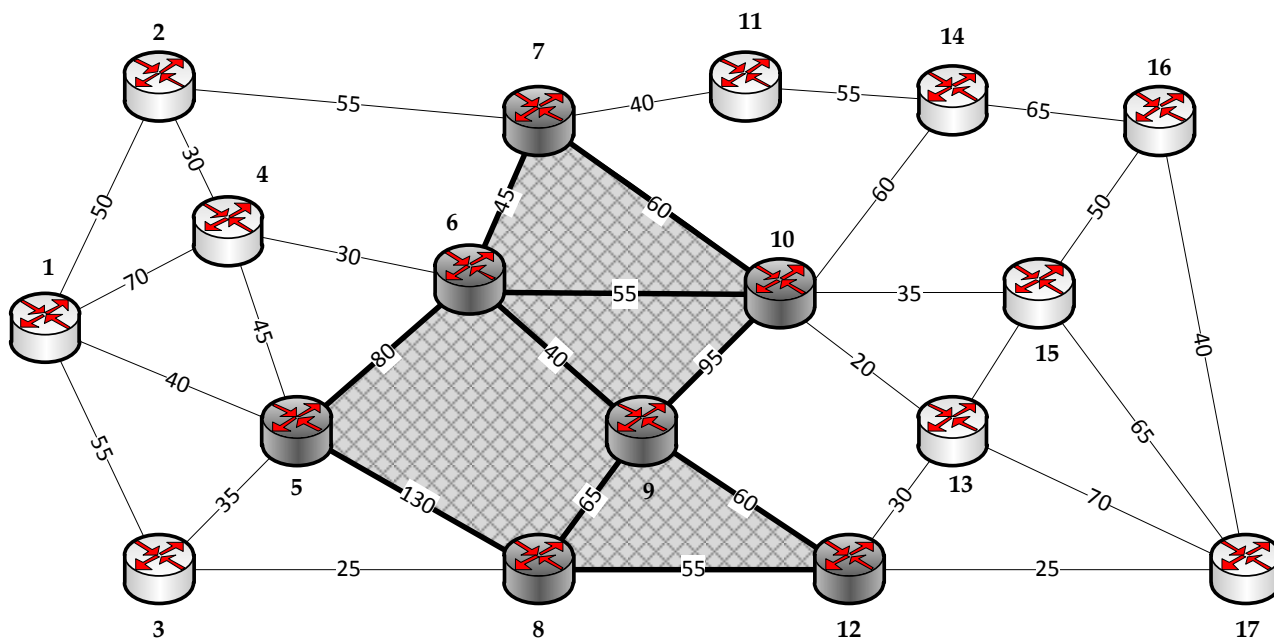


Рис. 2. Структура ТКС и граф решений задачи управления трафиком интенсивности 200 Мбит/с

Кроме того, важно отметить, что граф решений задачи управления трафиком может существенно отличаться от исходной структуры сети. Это связано с тем, что в рамках предложенной модели (1)-(7) используется минимум канальных ресурсов (в т.ч. и количество каналов связи в целом) для обеспечения гарантированного QoS. Поэтому при решении задач QoS нецелесообразно использовать информацию о состоянии всей сети, необходимо ограничить поиск графа решений некоторой заранее определенной областью. А с целью повышения масштабируемости решений задач управления трафиком в рамках модели (1)-(7) расчет маршрутных переменных и переменных, отвечающих за динамическое распределение канального ресурса, целесообразно производить, основываясь не на общей структуре сети, а на структуре предварительно выбранной наложенной (оверлейной) сети, максимально совпадающей с предполагаемым графом решений. Таким образом, актуальной представляется задача, связанная с расчетом (определением) структуры подобной оверлейной сети (Overlay Network, ON). При этом структура оверлейной сети должна макси-

мально адаптироваться к уровню QoS-требований. В предельном случае оверлейная сеть должна полностью совпадать с предполагаемым графом решений.

Для многопродуктового многополюсного случая, т.е. при обслуживании одновременно множества трафиков различных пользователей, циркулирующих между различными парами «отправитель-получатель», сеть может быть представлена уже множеством оверлейных сетей (рис. 3), которые в общем случае могут пересекаться, т.е. содержать общие узлы и каналы связи сети.

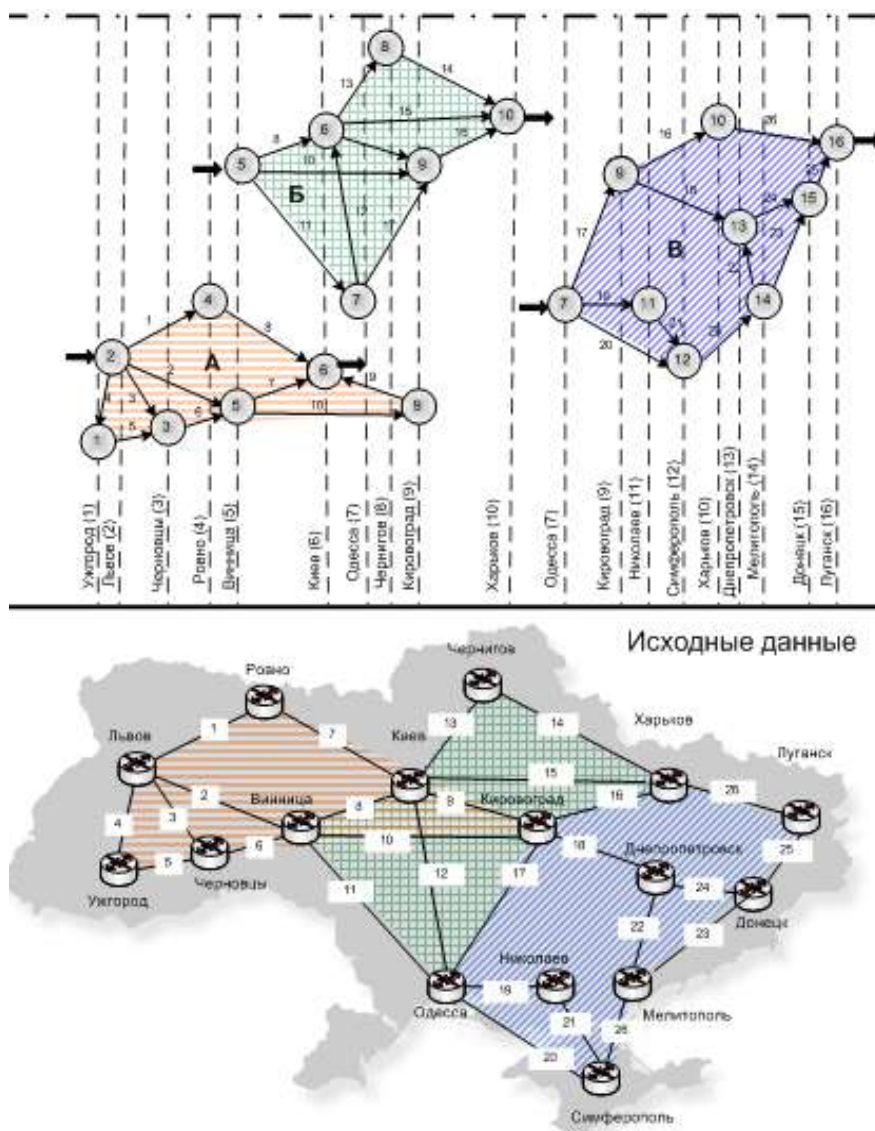


Рис. 3. Пример выбора оверлейных сетей на структуре территориально-распределенной ТКС

В этой связи в данной статье предлагается подход к решению задачи управления трафиком, основанный на использовании оверлейных сетей, структура которых рассчитывается с учетом QoS-требований. В последующем, комплексное решение задач многопутевой маршрутизации и динамического распределения канальных ресурсов уже происходит на структуре ON, которая имеет размерность значительно меньшую по сравнению со структурой исходной ТКС.

### III. Метод управления трафиком в территориально-распределенных мультисервисных ТКС

Обобщенная структура метода представляет собой иерархическую структуру, состоящую из 5 этапов в соответствии с решаемыми задачами.

**Этап 1.** Анализ исходных данных для решения задачи:

- анализ структуры ТКС (числа узлов, каналов связи, связности сети);
- анализ количества и содержания поддерживаемых служб;
- анализ требований к качеству обслуживания для трафиков каждой службы ( $r_{\text{треб}}^{(\theta)}$ ,  $\tau_{\text{треб}}^{(\theta)}$ ,  $\sigma_{\text{треб}}^{(\theta)}$ ,  $p_{\text{треб}}^{(\theta)}$ ) в соответствии с договором на обслуживание (SLA) [6].

**Этап 2.** Адаптивный выбор структуры оверлейных сетей для каждой пары узлов «отправитель-получатель».

После анализа исходных данных осуществляется выбор оверлейной структуры, по которой в дальнейшем осуществляются все расчеты. Для определения структуры ОН предлагается использовать алгоритмы расчета мультипутей. Их применение основано на переходе от формализации задач нахождения кратчайшего пути в сети к описанию задач поиска некоторого множества путей – мультипутей (multipath). В результате расчетов определяется мультипуть, оптимальный в рамках выбранной метрики, который и принимался в качестве структуры оверлейной сети.

Основными алгоритмами поиска мультипутей в сети между заданной парой узлов являются [10-12]:

- ECOMP (Equal Cost Multipath) – алгоритм расчета путей равной стоимости, который может использоваться в расширениях протокола OSPF, оптимизированного под многопутевые решения;
- DASM (Diffusing Algorithm for Shortest Multipath) – алгоритм, обобщающий алгоритмы Дейкстры/Шолтена и гарантирующий отсутствие петель в рассчитываемых таблицах маршрутизации;
- ROAM (Routing On-Demand Acyclic Multipath) – алгоритм, поддерживающий многопутевой способ доставки пакетов без образования петель, он адаптирован для сетей с ограниченной мобильностью;
- MDVA (multipath distance vector algorithm) – алгоритм, который обобщает распределенный алгоритм Беллмана-Форда на случай расчета множества кратчайших путей;
- MPATH (Multipath Routing Algorithm) – алгоритм, обобщающий дерево кратчайших путей, получаемых в алгоритмах Дейкстры и Беллмана-Форда, в граф кратчайших мультипутей разной стоимости;
- MPDA (Multipath Partial Dissemination Algorithm), QMPDA (Quality Multiple Partial Dissemination Algorithm) – алгоритмы с частичным распространением информации о состоянии сети, которые обеспечивают расчет множества беспетельных путей с учетом изменения состояния сети, в т.ч. при выходе их из строя (QMPDA), также поддерживает различные классы обслуживания трафиков.

При выборе структуры ОН также может использоваться, например, алгоритм двойного поиска, который находит  $k$ -кратчайших путей из некоторой фиксирован-

ной вершины ко всем остальным вершинам исходного графа. Обобщенный алгоритм Данцига и обобщенный алгоритм Флойда также находят  $k$ -первых кратчайших путей между каждой парой вершин исходного графа [13]. Суть данных алгоритмов состоит в выполнении последовательности операций сложения и сравнения на минимум. Применение первого алгоритма, как показал анализ, в вычислительном аспекте не слишком эффективно, так как часть информации, получаемой в ходе решения, не используется. В основу обобщенных алгоритмов Данцига и Флойда положены те же принципы, что и при построении исходного алгоритма. Отличие состоит в том, что в обобщенных алгоритмах используются обобщенные операции сложения и сравнения. Кроме того, в этих алгоритмах возможно возникновение кратчайших путей, включающих контуры, привязанные к начальной и конечной вершинам рассматриваемых путей. Отличительной особенностью отмеченных алгоритмов поиска  $k$ -кратчайших путей является то, что получаемые в итоге пути, в общем случае, могут пересекаться.

Возможно несколько вариантов решения задачи выбора ON в зависимости от уровня QoS-требований и загруженности сети. На основе анализа загруженности ТКС ( $\rho$ ) принимается решение об использовании того или иного алгоритма для выбора структуры оверлейных сетей для каждой пары узлов. Структурная схема метода управления трафиком с обеспечением гарантированного QoS на основе адаптивного выбора структуры ON и комплексного решения задач многопутевой маршрутизации и динамического распределения канального ресурсов приведена на рис. 4.

Экспериментально установлено, что в случае, если  $\rho \leq (0,65...0,7)$ , выбор структуры ON лучше осуществлять с помощью графокомбинаторных алгоритмов поиска кратчайшего мультипути. В случае, если  $\rho \geq (0,65...0,7)$ , выбор структуры ON осуществляется с помощью алгоритмов поиска  $k$ -кратчайших путей. Применение алгоритмов поиска  $k$ -кратчайших путей возможно также и при  $\rho \leq (0,65...0,7)$ , в случае высоких QoS-требований (например при передаче мультимедийной информации реального времени).

**Этап 3.** На выбранной структуре ON осуществляется расчет маршрутных переменных и переменных управления канальными ресурсами в рамках описанной выше комплексной модели (1)-(7).

**Этап 4.** Полученные решения анализируются на предмет выполнения условий обеспечения гарантированного QoS (6). В случае невыполнения условий необходимо пересмотреть выбор структуры ON (этап 2) (например, перейти от структуры с непересекающимися путями к структуре с пересекающимися путями).

Если после выбора новой структуры ON и решения комплексной задачи требования не выполняются, необходимо пересмотреть исходные данные (этап 1) в сторону ослабления QoS-требований, если это возможно. В противном случае некоторые трафики, как правило менее приоритетные, получают отказ в обслуживании.



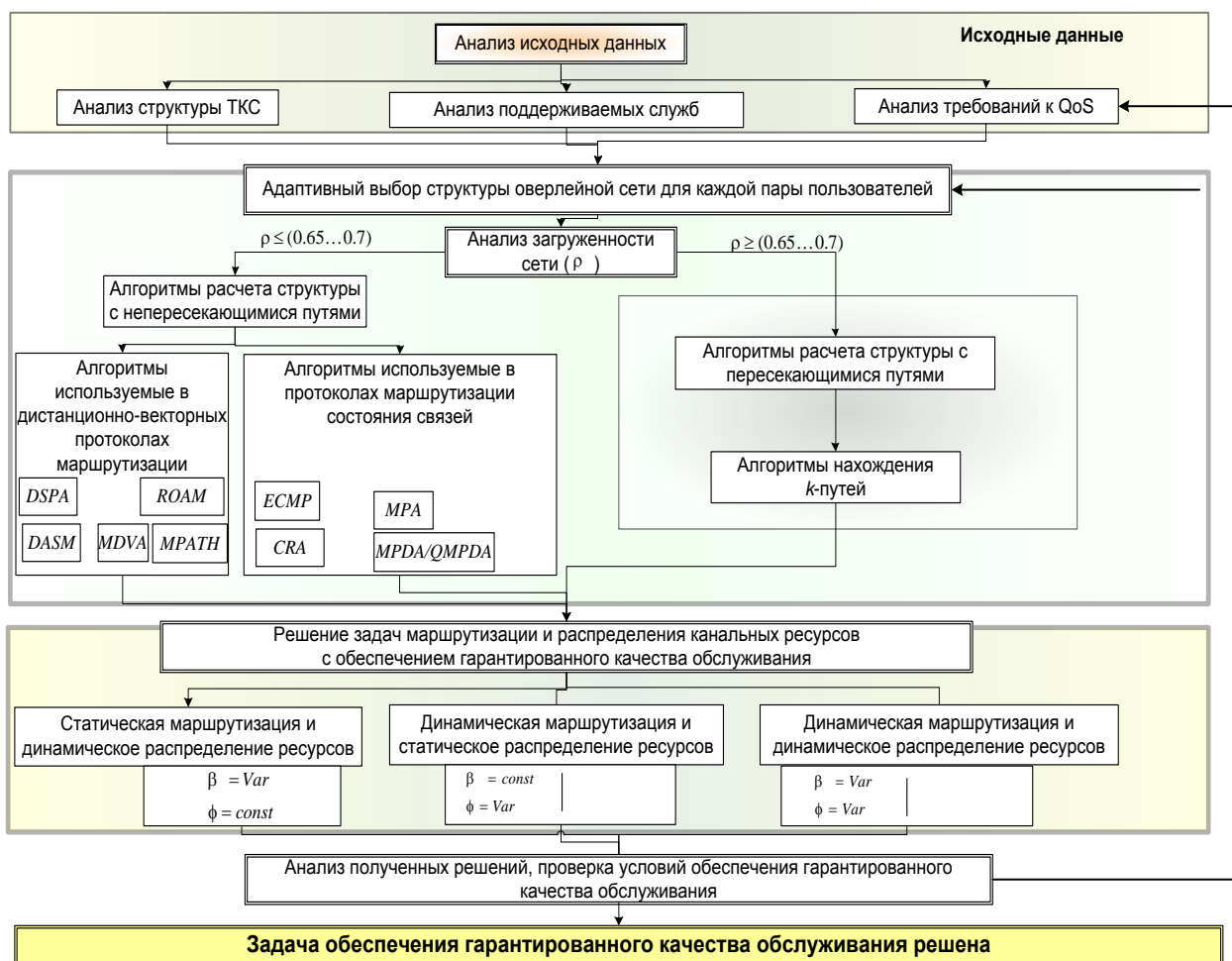


Рис. 4. Структура метода управления трафиком с обеспечением гарантированного QoS

#### IV. Исследование процесса управления трафиком в рамках предложенной модели и метода

Важным этапом разработки моделей и методов управления трафиком с обеспечением гарантированного QoS в ТКС является их экспериментальное исследование. Одним из способов оценки эффективности метода с точки зрения принятых показателей с определением вариантов их наиболее рационального использования является использование методов аналитического и имитационного моделирования, а также средств натурального эксперимента. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Так, например, натуральный эксперимент позволяет получить наиболее достоверные результаты исследований, однако для его результативного проведения необходимо располагать не только реальным сетевым оборудованием, но и возможностью изменения его алгоритмов (программ) функционирования в соответствии с полученными в работе результатами.

В ряде случаев, когда проведение натурального эксперимента невозможно или слишком затруднено ввиду значительных временных и (или) материальных затрат,

результаты аналитического моделирования необходимо проверять с использованием средств имитационного моделирования, которые в настоящее время представлены в виде программных оболочек или аппаратно-программных комплексов. Ограниченность заключается в том, что решение задач возможно только при задании небольшого количества сочетаний исследуемых параметров системы.

В данной статье целесообразность использования средств имитационного моделирования в рамках разработанного метода обусловлена, во-первых, сложностью и трудоемкостью математических процедур, во-вторых, необходимостью оценить влияние параметров управления сетевыми ресурсами и осуществить наблюдение за поведением ТКС в течение определенного временного периода, в-третьих, потребностью в предварительной проверке перспективных стратегий управления канальными ресурсами с выработкой правил для дальнейших экспериментов на реальных системах, в-четвертых, необходимостью определения «узких мест» в функционировании ТКС с реализацией предложенного метода и других трудностей, возникающих в поведении системы при введении в нее новых компонентов (комплексных таблиц маршрутизации и управления канальными ресурсами).

### **Описание схемы эксперимента с использованием пакета имитационного моделирования TOTEM**

В настоящее время для решения задач имитационного моделирования телекоммуникационных сетей и систем существует достаточно широкий спектр программных средств – от библиотек функций для стандартных компиляторов до специализированных языков программирования. Существуют также специальные языки имитационного моделирования (SIMULA, GPSS, SIMDIS и др.), которые облегчают процесс создания программной модели по сравнению с использованием универсальных языков программирования. К специализированным средствам моделирования, ориентированным на исследование именно телекоммуникационных сетей и систем, прежде всего, можно отнести OPNET Modeler производства Mil3 Inc., OMNET, BONESS, COMNET III производства Caci Products Co., Network Simulator v.2/3, TOTEM (TOolbox for Traffic Engineering Methods) и др. Перечисленные системы моделирования в целом обладают достаточно похожими функциями и наборами возможностей, предоставляемых пользователю. Принципиальное различие заключается только в языке программирования, используемого для реализации пользовательских функций и протоколов.

Для проведения исследования был выбран пакет TOTEM, который позволяет осуществлять имитационное моделирование широкого перечня процессов информационного обмена, протекающих в ТКС, и обладает целым рядом характеристик, среди которых высокая производительность и масштабируемость, визуализация результатов и гибкость. Достоинством пакета TOTEM также является возможность модификации ядра программы и гибкая настройка в соответствии с требованиями конкретного пользователя. На уровне ядра реализованы практически все известные протоколы существующих телекоммуникационных технологий (MPLS, IPv6, ATM).

Кроме этого выбор пакета TOTEM обусловлен следующими факторами: наличием необходимой математической поддержки, что позволило создавать различные виды трафика, начиная от простейшего, подчиняющегося пуассоновскому закону, и заканчивая нестационарным трафиком с возможными всплесками интенсивности; осуществлением имитационного моделирования, проводимого с использованием данного средства в соответствии с концепцией и методами ТЕ. Гибкость использования TOTEM заключалась в возможности реализовывать собственные математические функции в частности на языке C++ для исследования предложенного метода обеспечения гарантированного QoS в ТКС.

В соответствии со схемой эксперимента (рис. 5), в нем не имитировался полностью во всех деталях процесс обмена информацией в ТКС, а было уделено внимание лишь тем сторонам, которые отражают содержание разработанного метода управления трафиком с обеспечением QoS: формированию очередей на маршрутизаторах, сбору и статистической обработке информации о состоянии сети и интенсивности абонентских потоков, расчету и реализации маршрутных таблиц; распределению канальных ресурсов и т.д.

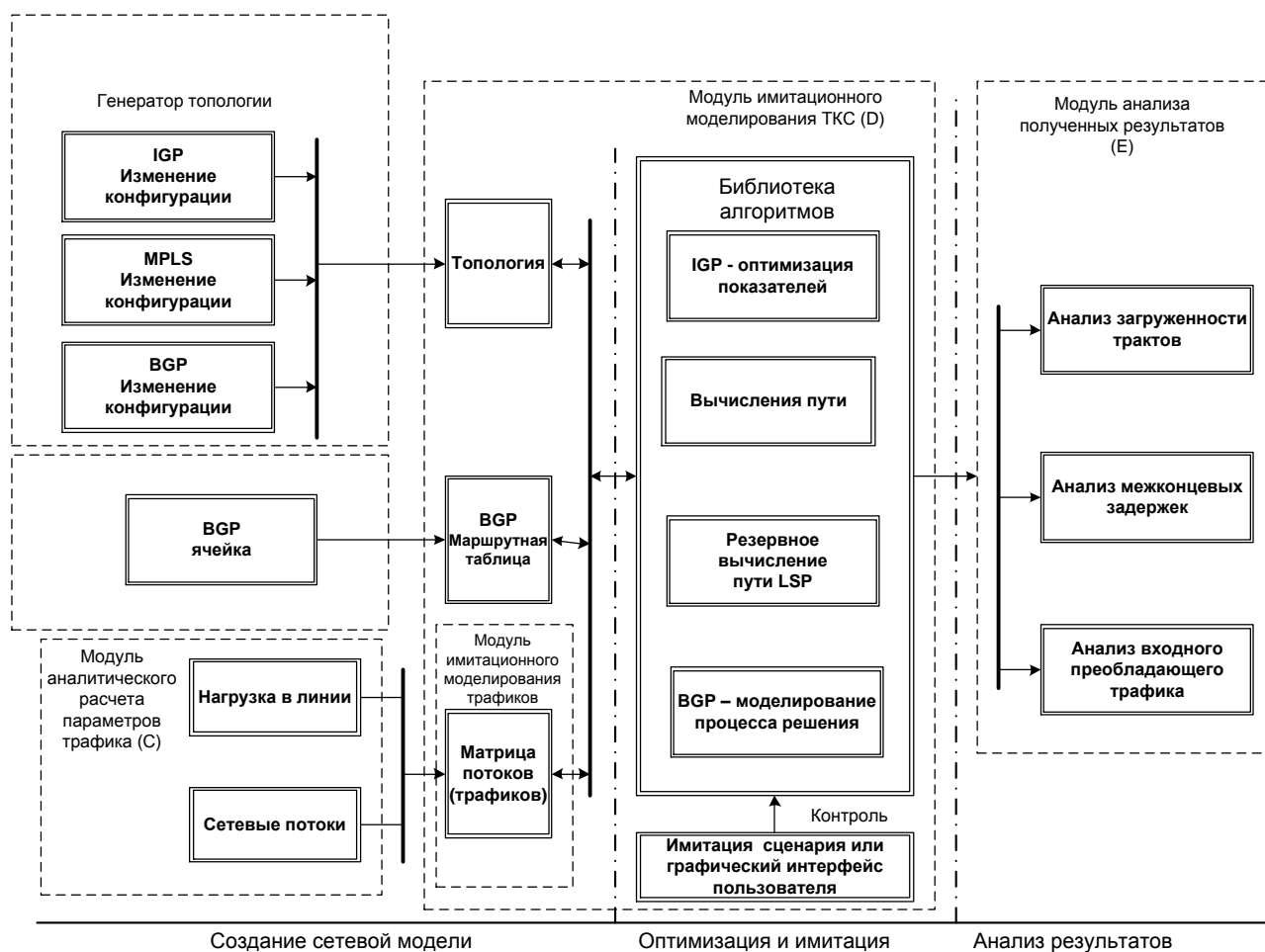


Рис. 5. Модель эксперимента, основанная на использовании пакета имитационного моделирования TOTEM

Результаты расчета маршрутных таблиц и параметров распределения ресурсов сети между множеством трафиков пользователей, как итог аналитического моделирования, передавались в пакет TOTEM и реализовывались в нем путем задания и динамического изменения базы данных глобальной топологии. В результате работы пакета TOTEM в модуле анализа полученных результатов отслеживается статистика о значениях следующих показателей:

- загруженность трактов передачи;
- средняя задержка (время доставки) пакетов различных типов;
- гистограмма и функция распределения задержки (времени доставки) пакетов;
- количество пакетов различных типов, дошедших до адресата за единицу времени (анализ преобладающего трафика);
- количество отказов в доставке пакетов по различным причинам (перегрузка очередей и каналов связи, превышение допустимого времени пребывания в сети).

Генератор топологии ТКС с использованием модулей IGP, MPLS и BGP-конфигурации пакета TOTEM (рис. 5) позволял создавать топологию территориально-распределенной сети без необходимости ручного определения ее компонентов. Примеры структур моделируемых ТКС приведены на рис. 6.

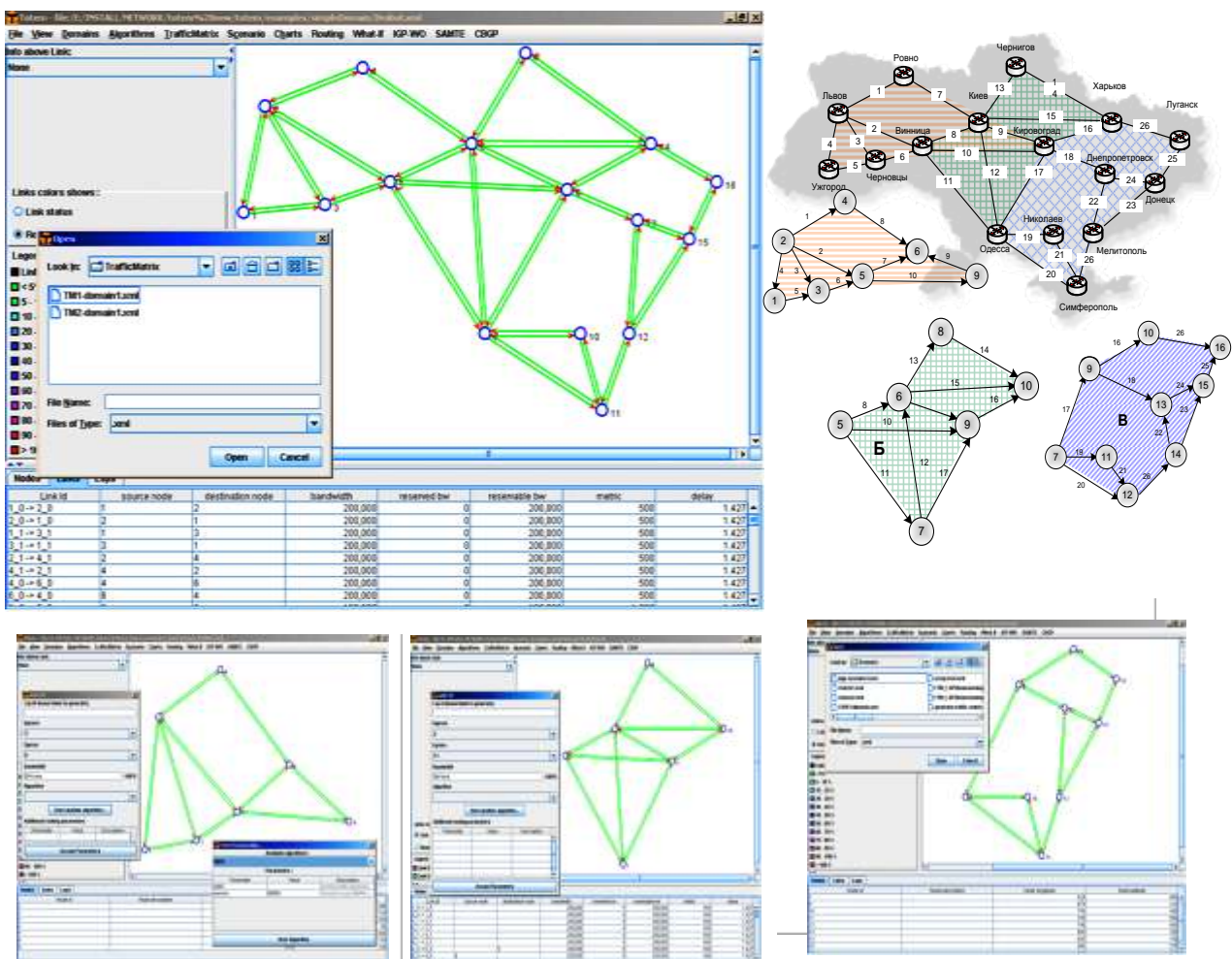


Рис. 6. Пример использования пакета имитационного моделирования TOTEM

## Анализ предложенного метода управления трафиком

В ходе исследования метода к рассмотрению принимались структуры ТКС, состоящие из 10 ÷ 50 сетевых узлов ( $m$ ) (на примере сети "Укртелеком") (рис. 3), связность ( $k_{св}$ ) которых варьировалась в пределах от 2 до 5. Принималось, что все каналы связи образованы дуплексными каналами связи, пропускные способности варьировались от 100 до 300 Мбайт/с. Следует отметить, что использование модели (1)-(7) в рамках предложенного метода позволяет обеспечить пропорциональный рост объема используемых ресурсов в зависимости от величины внешней загрузки  $r_0$  и QoS-требований (6). В свою очередь, это позволило обеспечить те же значения показателей QoS, что и при использовании известных моделей маршрутизации, заложенных в протоколы RIP, IGRP, OSPF, при этом сократив объемы используемых канальных ресурсов в среднем от 15 до 30 %.

Оценка масштабируемости решений, получаемых в рамках предложенного метода, производилась по показателям временной и вычислительной сложности, а также по степени близости структур ON и графа решений. Степень идентичности (близости) структуры ON и графа решений оценивалась по коэффициенту идентичности  $k_{и}$ , для расчета которого использовалось следующее выражение:

$$k_{и} = n_*/n_o, \quad (8)$$

в котором  $n_o$  – число каналов в структуре ON;  $n_*$  – число каналов в исходной ТКС, которые представлены одновременно и в ON, и в графе решений.

Исследование метода осуществлялось в нескольких вариантах (А-Г) в зависимости от исходных данных по загруженности ТКС и уровня QoS-требований, представленных в таблице.

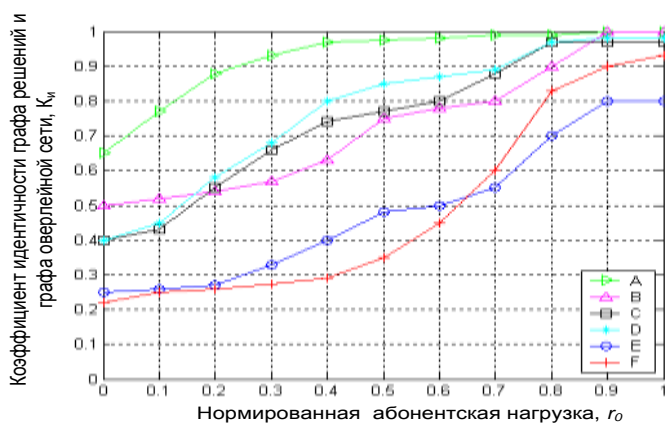
Таблица. Исходные данные по загруженности ТКС и уровня QoS-требований

| № варианта | Уровень QoS | Загруженность ТКС | № варианта | Уровень QoS                | Загруженность ТКС |
|------------|-------------|-------------------|------------|----------------------------|-------------------|
| А          | низкий      | высокая           | Е          | высокий                    | низкая            |
| В          | низкий      | низкая            | Ф          | высокий                    | высокая           |
| С          | средний     | низкая            | Г          | Комплексная модель (1)-(7) |                   |
| Д          | средний     | высокая           |            |                            |                   |

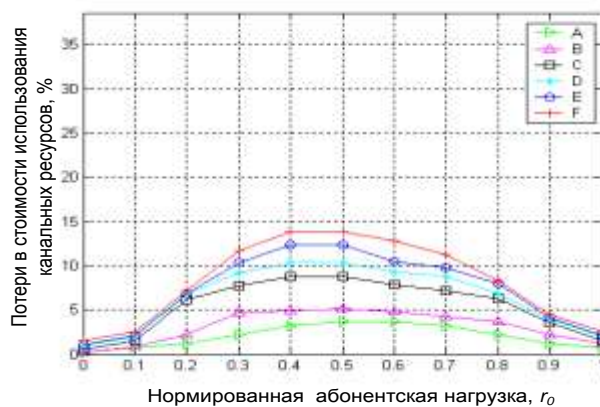
Как показали результаты анализа (рис. 7), с ростом загруженности ТКС практически для всех вариантов использования предложенного метода (рис. 4) коэффициент идентичности (8) с ростом  $r_0$  также возрастал. При этом в зоне низких нагрузок ( $r_0 = 0,1 ÷ 0,3$ )  $k_{и} \approx 0,3 ÷ 0,5$ ; в зоне средней нагрузки ( $r_0 = 0,3 ÷ 0,6$ )  $k \approx 0,6 ÷ 0,75$ ; в зоне высокой нагрузки ( $r_0 = 0,6 ÷ 0,9$ )  $k_{и} \approx 0,7 ÷ 0,9$ .

Значение коэффициента идентичности (рис. 7 а) в конечном итоге сказывалось на суммарной стоимости использования сетевых ресурсов (7) при решении задач обеспечения QoS (рис. 7 б). Чем выше значения  $k_{и}$ , тем меньше должно быть рас-

хождение в стоимости использования канальных ресурсов при решении задач обеспечения QoS, основываясь на исходной (полной) структуре ТКС или только на структуре ON. Это особенно характерно для зоны высокой нагрузки (рис. 7 б), где расхождение в стоимости в среднем составляло 5-7%. Однако при больших значениях коэффициента идентичности ( $k_{и} \approx 0.3, \dots, 0.5$ ) в зоне низких нагрузок наблюдалась преимущественно ситуация, когда ON не повторяла граф решений, но практически содержала его в качестве своей подсети, что также не способствовало излишнему росту стоимости использования канальных ресурсов. Расхождения в структуре ON и графа решений в области средней нагрузки ( $r_0 = 0,3 \div 0,6$ ) приводило к повышению общей стоимости использования сетевых ресурсов в среднем до 11-15% (рис. 7 б).



а)



б)

Рис. 7. Результаты анализа качества работы алгоритмов выбора структуры оверлейных сетей

В общем случае размерность оптимизационной задачи определяется количеством управляющих переменных и зависит от числа узлов, количества каналов связи и поддерживаемых сетью служб. Сложность реализации комплексной модели составляет  $R = \Theta(m^2(m-1) + n)$ . В рамках предложенного метода за счет применения алгоритмов выбора ON размерность задачи обеспечения QoS может быть значительно уменьшена (в среднем на 30-55%) за счет снижения количества анализируе-

мых на сети узлов и каналов связи (рис. 8). При этом использование алгоритма поиска  $k$ -кратчайших путей (A1) позволило сократить число каналов связи в ON по сравнению со структурой исходной ТКС в среднем на 25-55%; использование алгоритма МРАТН – в среднем на 40-60% (A2); использование алгоритма MDVA – в среднем на 40-75% (A3).

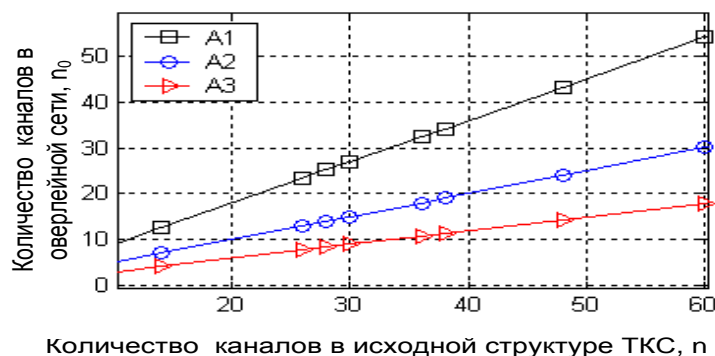
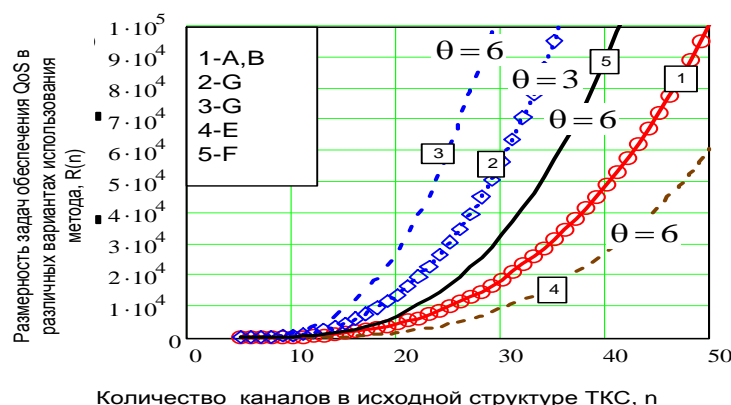
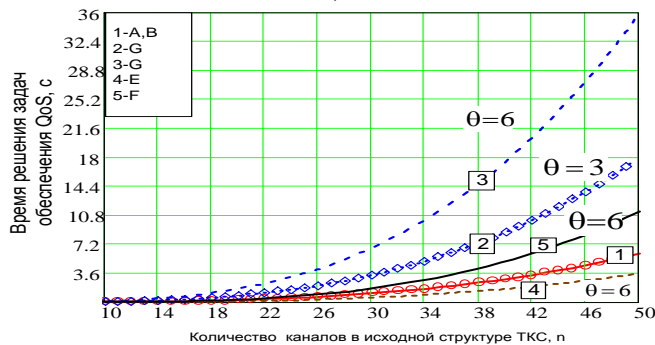


Рис. 8. Результаты анализа масштабируемости предложенного метода

Результаты сравнения размерности оптимизационных задач (7) при различных вариантах реализации метода (табл.) и числа поддерживаемых служб представлены на рис. 9 а.



а)



б)

Рис. 9. Результаты анализа вычислительной (а) и временной сложности (б) предложенного метода управления трафиком с обеспечением гарантированного QoS

Из полученных результатов можно сделать вывод, что использование метода управления трафиком для обеспечения QoS снижает сложность задач при одинаковом количестве служб в среднем в три-пять раз, т.к. при выборе оверлейной структуры снижается не только число анализируемых каналов связи (рис. 8), но и число узлов. Размерность решаемых задач непосредственно влияет на время решения, которое в целом определяет период пересчета, например, маршрутных таблиц и других управляющих воздействий. Как показали результаты моделирования (рис. 9 б), общее время решения задачи обеспечения QoS в рамках большинства вариантов реализации предлагаемого метода не превышало 30-35 с. Это вполне отвечает значениям таймеров (от 30 до 90 с) используемых на практике управляющих протоколов.

## Выводы

1. Предложены модель и метод управления трафиком с обеспечением гарантированного QoS на основе адаптивного выбора структуры ON и комплексного решения задач многопутевой маршрутизации и динамического распределения канальных ресурсов. Использование в методе оверлейных сетей ориентирует на повышение масштабируемости получаемых решений, т.к. решение задач многопутевой маршрутизации и распределения канальных ресурсов в итоге осуществляется на структуре значительно меньшей размерности.

2. Осуществлен анализ показателей эффективности, по которым оценивалось качество получаемых решений, связанных с обеспечением гарантированного качества обслуживания в мультисервисных ТКС, в рамках предложенного метода. Проведено экспериментальное исследование разработанного метода управления трафиком с обеспечением гарантированного QoS с использованием возможностей пакета имитационного моделирования TOTEM.

3. За счет применения алгоритмов выбора оверлейных сетей в рамках предложенного метода управления трафиком для обеспечения QoS удалось гарантировать заданные значения показателей качества обслуживания, но с существенным снижением (в три-пять раз) размерности положенной в основу данного метода оптимизационной задачи, что влечет за собой на практике пропорциональное снижение объемов циркулируемой служебной информации о загрузке каналов связи ТКС. При этом особенно ощутим выигрыш в применении разработанного метода для ТКС высокой размерности (с количеством узлов 15-20) и высокой связностью узлов (3 и выше), что характерно при построении современных территориально-распределенных мультисервисных сетей.

4. Предлагаемый метод отвечает требованиям современных концепций управления сетевыми ресурсами, трафиком и маршрутизацией, например Active network, Traffic Engineering, MultiPath Routing, QoS-Based Routing и Constraint-Based Routing, расширяя область применения в условиях согласованной реализации динамических стратегий многопутевой маршрутизации и распределения канальных ресурсов ТКС.

5. Практическая реализация метода управления трафиком для обеспечения гарантированного качества обслуживания не связана с коренным пересмотром прин-



ципов построения и функционирования существующих телекоммуникационных систем и систем сетевого управления.

### Список литературы:

1. Мультисервисные АТМ сети / Т.Б.Денисова, Б.Я.Лихтциндер, А.Н.Назаров и др. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 320 с.
2. *Вегенша Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
3. *Medhi D., Ramasamy K.* Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann Series in Networking: Elsevier Digital Press, 2007. – 788 p.
4. *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.
5. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Симоненко Д.В., Беленков А.Г.* Метод иерархического управления ресурсами телекоммуникационной сети с апериодической координацией по условиям обеспечения качества обслуживания // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. – Вып. 154. – С. 156–166.
6. *Лемешко А.В., Ахмад М. Хайлан, Али С. Али.* Целевая координация двухуровневой маршрутизации в MPLS-сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. – Вып. 159. – С. 41–45.
7. *Дробот О.А.* Комплексная модель обеспечения гарантированного качества обслуживания с реализацией динамических стратегий распределения сетевых ресурсов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – № 148. – С. 43–54.
8. *Лемешко А.В., Дробот О.А.* Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2006. – Вып. 144. – С. 16–22.
9. *Лемешко А.В., Добрышкин Ю.Н., Щербинин С.А.* Исследование модели управления трафиком с анализом областей превентивного ограничения его интенсивности на границе сети // Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць.– К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці Національної АН України. – 2008. – Вип. 49. – С. 65–71.
10. *Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J.* MPATH: a loop-free multipath routing algorithm // Elsevier Journal of Microprocessors and Microsystems. – 2001. – № 24 (6). – P. 319–327.
11. *Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J.* SMART: a scalable multipath architecture for intra-domain QoS provisioning // Proc. of International Workshop on QoS in Multiservice IP Networks (QOS-IP 2001). – Rome, 2001. – P. 67–79.
12. *Vutukury S.* Multipath routing mechanisms for traffic engineering and quality of service in the Internet // PhD Dissertation. University of Kalifornia, 2001. – 152 p.
13. *Jia Y., Nikoladis I., Gburzynski P.* Multiple path QoS routing // Proc. Int. Conf. Communications (ICC 2001). – Helsinki, 2001. – P. 2583–2587.