

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ С СОВМЕСТНОЙ БАЛАНСИРОВКОЙ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА И КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА

Зизевский В. А.¹

DOI:10.21681/3034-4050-2025-5-76-84

Ключевые слова: мультисервисная сеть, математическая модель, самоподобный трафик, совместная балансировка мультимедийного трафика и канального ресурса.

Аннотация

Цель работы: разработать и исследовать математическую модель мультисервисной транспортной сети связи (МТСС), учитывающую совместную балансировку мультимедийного трафика (ММТ) и канального ресурса (КР), с целью повышения эффективности функционирования сети и снижения сетевых задержек.

Методы исследования: использованы теоретико-игровой и аналитико-моделирующий подходы, методы оптимизации и имитационного моделирования, а также сравнительный анализ сценариев распределения потоков данных и ресурсов в сетях. Для обработки полученных результатов применялись статистические методы и аппроксимация имитационных данных.

Результаты исследования: разработана универсальная математическая модель МТСС с двухуровневым управлением: распределением канального ресурса на нижнем уровне и потоков данных – на верхнем. Модель позволяет оценивать задержки передачи пакетов и выявлять оптимальные варианты балансировки ММТ и КР. Проведённые численные эксперименты показали, что совместная балансировка (одновременное перераспределение и потоков, и ресурсов) обеспечивает минимальные значения средней сетевой задержки и повышает устойчивость к перегрузкам. Энергетический выигрыш выражается в снижении задержки на 25–40 % по сравнению с традиционным статическим распределением.

Научная новизна: предложена обобщённая модель сетевых задержек для МТСС с учётом самоподобного трафика и различных законов распределения межпакетных интервалов. Показано, что использование совместной балансировки ПД и КР позволяет учитывать статистические свойства трафика и существенно снижать вероятность перегрузки на отдельных маршрутах. Впервые обосновано применение рациональной аппроксимации средней задержки, обеспечивающей универсальность для разных сценариев моделирования.

Введение

Мультисервисные транспортные сети связи (МТСС) предназначены для передачи разнородных мультимедийных данных (голос, видео, потоковая передача и т.д.) по единой инфраструктуре. Традиционные методы жёсткого выделения фиксированного канального ресурса для каждого типа трафика приводят к неэффективному использованию сети в условиях переменной нагрузки. В современных системах актуально динамическое управление ресурсами и трафиком, при котором пропускная способность каналов и интенсивность потоков данных могут перераспределяться

по мере изменения нагрузки. Для этого разрабатываются модели, позволяющие анализировать влияние различных схем балансировки каналов и потоков на качество обслуживания.

В настоящей работе построена математическая модель МТСС, рассматривающая двухуровневое согласованное управление каналами и потоками данных. Нижний уровень модели определяет доли пропускной способности каналов, выделяемые для формирования цифровых каналов передачи; верхний уровень распределяет входные мультимедийные потоки между несколькими маршрутами. Такая модель впервые позволяет учитывать

¹ Зизевский Вадим Алексеевич, адъюнкт Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vaz94@mail.ru

статистические свойства мультисервисного трафика совместно с динамическим распределением ресурсов по путям. В ней сохраняются все основные варианты организации связей: прямые однокачковые и транзитные многоскачковые маршруты, общие и выделенные каналы, схемы с резервированием и без него, а также случаи совмещённого и разделённого переноса нагрузки. Ниже представлено формализованное описание указанной модели и результаты ее применения для оценки показателей сетевой задержки.

Математическая модель

В самом общем виде математическую модель МТСС с балансировкой ПД и КР можно представить в виде следующего макрообъекта:

$$G_{\text{MTSS}}(A, B, \Lambda, Z, Q), \quad (1)$$

где $A = a_i$ – множество узлов сети (численность узлов обозначается N); $B = b_r$ – совокупность линий связи, задающих доступный каналный ресурс сети; каждая линия характеризуется контролируемой пропускной способностью c_r , общее количество линий равно R ; $\Lambda = \lambda_k$ – набор входных потоков данных, заданных для корреспондирующих пар узлов (КПУ) $A_k = a_i, a_j$, измеряемых в единицах интенсивности передачи протокольных блоков данных (ПБД) объёмом V бит; $Z = (Z_{\text{кр}}, Z_{\text{пд}})$ – управляемые параметры распределения каналных ресурсов и потоков: $Z_{\text{кр}} = \gamma_{rl}$ описывает доли пропускной способности линий, выделяемых для формирования путей π , а $Z_{\text{пд}} = \alpha_{km}$ отражает доли потоков ПД, направляемых по маршрутам m ; $Q = \tau_k, p_{\text{пот.к}}, p_{\text{св.к}}, T$ – совокупность показателей качества обслуживания: τ_k – средняя задержка передачи ПБД для k -й пары узлов; $p_{\text{пот.к}}$ – вероятность потери ПБД (вследствие перегрузки или ошибок канала); $p_{\text{св.к}}$ – вероятность доставки ПБД в пределах допустимой задержки $\tau_{\text{доп.к}}$; T – интегральный показатель сетевой задержки для всех пар узлов (например, среднее значение по всей сети).

Параметры управления распределением потоков и ресурсов задаются на двух уровнях. Нижний уровень описывает разбиение канальной ёмкости рёбер сети: из ресурса c_r каждого ребра формируются цифровые каналы (ЦК) с пропускной способностью $g_{rl} = c_r \gamma_{rl}$, где γ_{rl} – доля выделенного ресурса. Образованные ЦК могут соответствовать либо однокачковым путям (через одно ребро), либо

многоскачковым маршрутам, включающим последовательность рёбер с промежуточной кроссовой коммутацией. Пропускная способность пути π_l определяется минимальным значением среди его участков, что обеспечивает согласованность ресурса на всём протяжении. Верхний уровень связан с распределением входных потоков λ_k между корреспондирующими парами узлов $A_k = a_i, a_j$. Для каждой пары выделяются внутрисетевые потоки данных интенсивности $d_{km} = \lambda_k \alpha_{km}$, где α_{km} – доля трафика, направляемая по маршруту m . Эти потоки могут передаваться как по прямым маршрутам (через один путь/ЦК), так и по транзитным, проходящим через несколько путей и маршрутизаторов. Каждый маршрут m принадлежит множеству M_k соответствующему паре узлов k .

Введём ограничения на управляемые параметры, обеспечивающие физическую реализуемость распределений КР и ПД. Во-первых, сумма долей ресурса всех путей, проходящих через одно ребро b_r , не должна превышать 1 (то есть суммарно не больше полного ресурса линии c_r).

Во-вторых, сумма долей трафика всех маршрутов между одними и теми же узлами должна равняться 1 (весь поток λ_k распределён по маршрутам). Эти ограничения записываются выражениями:

$$\sum_{l: r \in \pi_l} \gamma_{rl} \leq 1, \forall r \in R, \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M_k} \alpha_{km} = 1, \forall k. \quad (3)$$

Интенсивность внутрисетевого потока d_l , проходящего по пути π_l , определяется суммой частей входных потоков, направленных через этот путь. Пусть M_l – совокупность маршрутов, которые включают данный путь, а λ_{km} – соответствующие интенсивности трафика для пары узлов k по маршруту m . Тогда полная нагрузка на путь π_l равна сумме вкладов λ_{km} по всем маршрутам $m \in M_l$:

$$d_l = \sum_{m \in M_l} \lambda_{km} \alpha_{km, m}. \quad (4)$$

Важно подчеркнуть, что в пределах одного маршрута P_m отдельные его сегменты могут проходить через различные пути π_l , обладающие неодинаковой пропускной способностью цифровых каналов g_{rl} . Однако при описании одного конкретного пути π_l предполагается использование рёбер, формирующих ЦК с одинаковой пропускной характеристикой.

В рамках предложенной формализованной модели допускается произвольное распределение долей канального ресурса γ_{rl} при условии выполнения ограничений (2)–(3). Это приводит к необходимости введения правила выравнивания: пропускная способность всего пути π_l задаётся специальным выражением, которое определяет результирующее значение g_{rl} :

$$g_l = c_r \gamma_{rl}, \forall r: b_r \in \pi_l. \quad (5)$$

Для наглядности формализованная модель МТСС с двухуровневым управлением ресурсами и потоками представлена на рисунке 1.

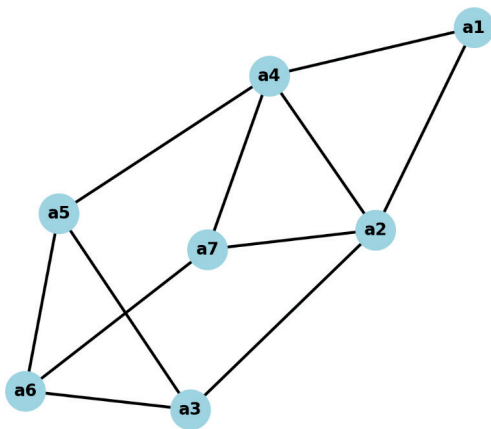


Рис. 1. Пример формализованного описания МТСС с согласованным двухуровневым управлением КР на нижнем уровне и ПД – на верхнем

На рисунке 1 показана сеть, включающая $N = 7$ узлов и $R = 11$ линий связи. Она обслуживает $K = 3$ корреспондирующие пары узлов: (a_1, a_3) , (a_1, a_5) , (a_1, a_6) . Для этих направлений заданы входные потоки данных с интенсивностями $\Lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. На нижнем уровне (отражающем распределение каналов) выделено $L = 10$ путей π_l , обозначенных сплошными линиями. Верхний уровень (маршрутизация потоков) содержит $M = 8$ маршрутов. Среди путей присутствуют как однокачковые (например, π_3 через ребро b_4 , π_4 через ребро b_5 и т.д.), так и многоскачковые, проходящие через несколько звеньев, например $\pi_1 = (b_1, b_2)$, $\pi_2 = (b_1, b_3)$. Аналогично маршруты могут быть прямыми – по одному пути/ЦК, либо транзитными – через комбинацию нескольких путей с промежуточной коммутацией.

Для того чтобы количественно оценивать различные комбинации путей и маршрутов, а также распределение между ними канальных

ресурсов и потоков данных, вводится совокупность метрик качества: $Q = \tau_k, p_{\text{пот.к}}, p_{\text{св.к}}, T$. Эти показатели задаются в виде математических зависимостей, отражающих влияние управляемых параметров распределения Z (как по каналам, так и по потокам), а также контролируемых характеристик входных ПД (Λ) и доступных сетевых ресурсов (C).

Ключевым частным индикатором качества в модели является среднее время задержки τ_k доставки ПБД (пакетов или кадров) для конкретной пары узлов. Именно от значения τ_k производно изменение двух других характеристик: вероятности потерь $p_{\text{пот.к}}$ и вероятности своевременной доставки $p_{\text{св.к}}$. При росте задержек эти показатели закономерно ухудшаются. В дальнейшем внимание сосредоточено именно на параметре τ_k , который используется как базовый критерий для анализа эффективности схем балансировки.

Аппроксимация задержек

В ситуации, когда между парой узлов k доступно несколько маршрутов ($|M_k| > 1$), входной поток λ_k может быть разделён на части α_{km} , направляемые по разным маршрутам $m \in M_k$. В этом случае итоговое значение задержки τ_k формируется из задержек на отдельных маршрутах τ_{km} и зависит от способа комбинирования этих долей. В традиционных пакетных сетях обычно используется статистическое объединение потоков: средняя задержка для пары узлов рассчитывается как средневзвешенная величина по всем маршрутам, где веса соответствуют долям α_{km} [2–5]:

$$\tau_k = \sum_{m \in M_k} \alpha_{km} \tau_{km}. \quad (6)$$

В то же время в транспортной сети с двухуровневой структурой коммутации допустимы иные механизмы разделения и объединения, согласованные с перераспределением канального ресурса. Так, разделение потоков может происходить не только в конечных точках связи, но и в промежуточных узлах, что фактически эквивалентно распределению нагрузки между сегментами маршрута. Несмотря на такие возможные варианты, формула (6) отражает наиболее характерный и распространённый случай, поэтому именно её принимаем за основу для дальнейших вычислений τ_k .

Отличительной особенностью устройств пакетной коммутации (в отличие от кроссовой) является «приостановка» коммутируемых

пакетов на время их обработки в коммутаторе (маршрутизаторе) перед дальнейшей передачей. Эта особенность позволяет вычислять общую задержку τ_{km} передачи ПБД по маршруту m как сумму задержек τ_l на последовательных участках маршрута — между соседними устройствами пакетной коммутации. Количество таких участков равно количеству путей $|\Pi_m|$ на маршруте m (здесь Π_m — цепочка номеров путей, образующих маршрут):

$$\tau_{km} = \sum_{l \in \Pi_m} \tau_l. \quad (7)$$

Задержка τ_l на отдельном пути π_l определяется суммой четырёх основных слагаемых:

$$\tau_l = \tau_{l, \text{расп}} + \tau_{l, \text{ком}} + \tau_{l, \text{кан}} + \tau_{l, \text{ож}}. \quad (8)$$

Здесь $\tau_{l, \text{расп}}$ — задержка распространения сигнала (зависящая в основном от физической длины пути $R_l^{\text{расп}}$ и скорости распространения сигнала $C_{l, \text{эвб}}$ по среде передачи, обычно рассчитывается как $\tau_{l, \text{расп}} = R_l^{\text{расп}} / C_{l, \text{эвб}}$; $\tau_{l, \text{ком}}$ — задержка коммутации (определяется производительностью устройства коммутации S_l , приведённой к входу ЦК пути l , например, если S_l задана в пак/с для пакетов размера V , то $\tau_{l, \text{ком}} = 1 / S_l$; $\tau_{l, \text{кан}}$ — задержка в канале передачи (определяется объёмом передаваемого ПБД V и скоростью передачи g_l на данном ЦК: $\tau_{l, \text{кан}} = V / g_l$).

Наиболее значимым и сложным для анализа элементом выступает задержка ожидания $\tau_{l, \text{ож}}$, возникающая перед передачей пакетов по пути l . Она формируется в ситуациях, когда поступающий поток данных превышает скорость их обработки и передачи. Величина $\tau_{l, \text{ож}}$ определяется отношением интенсивности входного трафика λ_l , подаваемого на вход цифрового канала пути l , к обслуживающей способности данного канала μ_l . Последний параметр μ_l эквивалентен обратной величине средней задержки в канале и характеризует пропускную способность обслуживающего устройства. Здесь μ_l равна обратной величине задержки в канале $\tau_{l, \text{кан}}$ и прямо пропорциональна скорости передачи g_l : $\mu_l = 1 / \tau_{l, \text{кан}} = g_l / V$. Отношение $\rho_l = \lambda_l / \mu_l$ принято называть нагрузкой на ЦК пути l . Из-за случайности моментов поступления пакетов время ожидания $\tau_{l, \text{ож}}$ является случайной величиной, поэтому для оценки среднего времени ожидания используются различные вероятностные модели СМО (систем массового обслуживания)

[2,3,6]. Например, для простейшей модели с экспоненциальным распределением входных интервалов и длительностей обслуживания (то есть для СМО М/М/1 с ожиданием) средняя задержка ожидания определяется классической формулой

$$\tau_{l, \text{ож}} = \tau_{l, \text{кан}} \frac{\rho_l}{1 - \rho_l}, \text{ при } \rho_l < 1$$

(при $\rho_l \rightarrow 1$ она стремится к бесконечности).

Для более сложных (реалистичных для ММТ) случаев входных самоподобных потоков с тяжёлыми хвостами распределений применяются аппроксимации, основанные на статистических результатах имитационного моделирования. В случае, когда первыми двумя слагаемыми в (8) можно пренебречь (малые задержки распространения и коммутации), используется упрощённая формула расчета средней задержки на пути l , зависящая главным образом от нагрузки $\rho_l = \lambda_l / \mu_l$. В модели введена связь $\tau_{l, \text{ож}} = \tau_{l, \text{кан}} q(\rho)$, где функция $q(\rho)$ характеризует относительное время ожидания в очереди (в долях от задержки передачи) в зависимости от нагрузки ρ . При разных статистических свойствах входных потоков форма зависимости $q(\rho)$ различается. На основании результатов [7] статистическая зависимость относительного среднего времени ожидания $q(\rho)$ от нагрузки ρ аппроксимируется в модели следующей формулой:

$$q(\rho) = \frac{1}{(1 - (\frac{\rho}{\rho_0})^a)^b} - c. \quad (9)$$

Параметры аппроксимации ρ_0 , a , b , c зависят от выбранного типа распределений длительностей входных интервалов $G_{\text{вх}}$ и обслуживания $G_{\text{вых}}$. Узлы МТСС в модели тракуются как одноканальные системы массового обслуживания вида $G_{\text{вх}} / G_{\text{вых}} / 1$ с ожиданием. Базовыми характеристиками распределений $G_{\text{вх}}$ и $G_{\text{вых}}$ выступают средние времена: интервалов между поступлением пакетов $\tau_{\text{вх}}$ и обслуживания пакетов $\tau_{\text{об}}$. Им соответствуют интенсивности $\lambda_l = 1 / \tau_{\text{вх}, l}$ и $\mu_l = 1 / \tau_{\text{об}, l}$, которые в совокупности формируют загрузку канала $\rho_l = \lambda_l / \mu_l$ в формуле (9). Для описания самоподобных потоков с долгосрочной корреляцией дополнительно вводится параметр Хёрста H . В зависимости от значения H и выбранных распределений в [7] были рассчитаны параметры аппроксимации ρ_0 , a , b , c для различных моделей узлов. Так, в роли распределений $G_{\text{вх}}$ использовались Вейбулла (W)

и Парето (P), а для $G_{\text{вых}}$ рассматривались экспоненциальное (M , Markovian) и детерминированное (D). В последующих исследованиях [8] аналогичные зависимости были получены и для случая логнормального распределения (L), выступающего в качестве $G_{\text{вых}}$. Таким образом, формула (9) сохраняет универсальность для разных сочетаний трафика и моделей обслуживания, а конкретные значения параметров ρ_0 , a , b , c определяются спецификой исследуемого трафика.

Для иллюстрации функции $q(\rho)$ на рис. 2 приведены графики зависимости относительного времени ожидания от нагрузки для различных типов входного трафика. Видно, что при марковском (пуассоновском) входном потоке график $q(\rho)$ имеет форму, близкую к кривой $\rho / (1 - \rho)$ (резко возрастает при $\rho \rightarrow 1$). Для самоподобных потоков с тяжёлыми хвостами распределения (например, распределение Парето для интервалов между пакетами) рост времени ожидания начинается раньше (эффективная нагрузка ρ_0 меньше 1) и происходит более резко (больше показатель b).

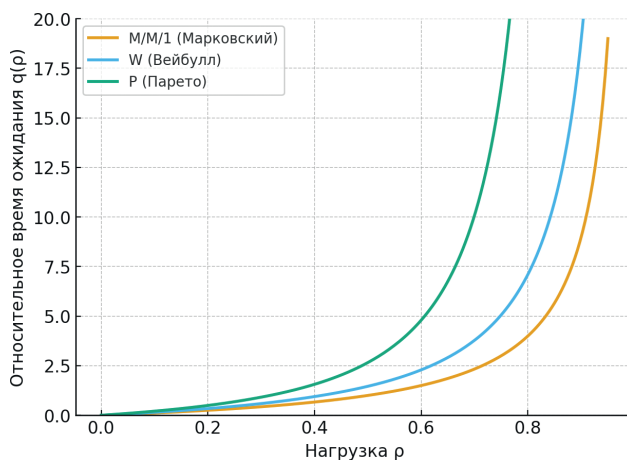


Рис. 2. Графики зависимости $q(\rho)$ от нагрузки ρ для разных моделей входного трафика

На графике показано изменение относительного среднего времени ожидания q в очереди в зависимости от нагрузки ρ для трех случаев: марковский входной поток ($M/M/1$), самоподобный поток с распределением Вейбулла (W) и с распределением Парето (P). Параметры аппроксимации (9) для этих случаев приняты условно равными: Марковский ($M/M/1$): $\rho_0 = 1$, $a = 1$, $b = 1$, $c = 1$; Вейбулл: $\rho_0 = 1$, $a = 1$, $b = 1.3$, $c = 1$; Парето: $\rho_0 = 0.9$, $a = 1$, $b = 1.6$, $c = 1$. Для самоподобных потоков рост времени ожидания начинается при меньшей ρ

и достигает больших значений q при приближении к области перегрузки ($\rho \rightarrow \rho_0$), чем для пуассоновского потока.

Интенсивность входного потока пакетов λ_l для пути l в МТСС определяется выбранными параметрами балансировки ПД α_{km} , а параметр обслуживания μ_l зависит от распределения канального ресурса γ_{rl} .

Если на каком-либо участке сети возникает перегрузка (например, вследствие изменений внешних потоков Λ или перераспределения ресурсов C), ситуация характеризуется приближением λ_l и μ_l , что ведёт к резкому росту задержки τ_l . В этом случае уменьшение задержки может быть достигнуто двумя путями: снижением входной интенсивности ПД (коррекция α_{km}) либо увеличением выделяемого канального ресурса (коррекция γ_{rl}). Следовательно, модель показывает, что существует несколько стратегий балансировки, позволяющих устранить перегрузки. Оптимальный выбор зависит от глобального критерия эффективности сети и тех ограничений, которые накладываются на распределение ресурсов.

В качестве интегрального критерия эффективности работы МТСС в модели принят показатель среднесетевой задержки T . Он определяется как агрегированное значение всех средних задержек τ_k между парами узлов и используется для сопоставления и оптимизации различных схем распределения потоков данных и канальных ресурсов. Для вычисления T применяются результаты расчётов τ_k по формуле (6) для всех направлений k . Дополнительные характеристики качества — такие как своевременность, достоверность и надёжность передачи — напрямую в расчёт не включаются, так как их изменение тесно связано с задержками. Увеличение задержек, как правило, сопровождается ростом вероятности потерь, нарушением сроков доставки и снижением устойчивости маршрутов.

В качестве способа свертки частных показателей τ_k в обобщенный критерий T предлагается использовать взвешенное усреднение:

$$T = \sum_k \beta_k \tau_k. \quad (10)$$

Здесь β_k — весовые коэффициенты, которые могут быть выбраны пропорционально важности соответствующих направлений (КПУ) для оператора сети. Например, β_k можно задать пропорционально средней нагрузке λ_k в направлении k , если более нагруженные направления считать более значимыми. В общем

случае выбор коэффициентов β_k осуществляется лицом, принимающим решение (ЛПР) при управлении МТСС.

Следует отметить, что использование усреднённого значения (10) сглаживает различия в задержках по отдельным направлениям. Для получения более строгой оценки в модель вводится нелинейная свёртка по принципу «наихудшего случая», обеспечивающая гарантированное значение сетевой задержки, одинаково применимое к любой паре узлов:

$$T_{\max} = \max_k \tau_k \quad (11)$$

При необходимости выражение (11), аналогично формуле (10), может быть расширено введением весовых коэффициентов или поправок на нагрузку, что позволяет выделить критически важные направления.

В обобщённой постановке критерий T при оптимизации может трактоваться как комбинация среднего и предельного значений (например, минимизация T при условии ограниченности сверху $T_{\max}$).

Таким образом, предложенная математическая модель МТСС с интегрированной балансировкой потоков данных и канальных ресурсов охватывает полный набор параметров и зависимостей, необходимых для анализа вариантов распределения, а также для оценки эффективности функционирования сети при различных характеристиках входного трафика и доступных ресурсов.

Численное моделирование

Для проверки адекватности модели были использованы результаты имитационного моделирования узлов МТСС при различных распределениях трафика. С помощью моделирования оценивались средние задержки τ_k и рассчитывался обобщенный показатель T для разных сценариев балансировки. Кроме того, на основе статистических данных моделирования определялись параметры аппроксимации $q(\rho)$ в формуле (9) для разных типов

трафика. Полученные параметры приведены в таблице 1. Видно, что для пуассоновского (Марковского) трафика параметры принимают значения, близкие к $\rho_0 = 1$, $a = 1$, $b = 1$, $c = 1$, тогда как для самоподобного трафика с тяжелыми хвостами (H близкий к 0,8) параметры ρ_0 становятся меньше 1 (что отражает более «раннее» наступление перегрузки), а показатель b увеличивается (более резкий рост задержки). Параметр c во всех рассмотренных случаях оказался близок к 1, обеспечивая условие $q(0) = 0$.

Для оценки эффективности различных вариантов балансировки были заданы несколько сценариев распределения ресурсов и потоков. В таблице 2 перечислены четыре сценария, отличающиеся включением/выключением балансировки ПД и КР. В первом сценарии («нет балансировки») трафик каждого направления передается по единственному маршруту, а канальные ресурсы маршрутов фиксированы. Это соответствует традиционному статическому распределению (без гибкого реагирования на нагрузку) и приводит к наибольшим задержкам. Во втором сценарии предусматривается только балансировка потоков данных (например, распределение трафика по двум маршрутам при фиксированном выделении ресурсов в каждый маршрут). В третьем сценарии, напротив, выполняется только балансировка ресурсов (например, перераспределение пропускной способности между двумя путями без дублирования маршрутов для потоков). Наконец, четвертый сценарий включает совместную балансировку и ПД, и КР – наиболее гибкий вариант. Средняя сетевая задержка T (полученная по формуле (10)) для каждого сценария показана в таблице 2.

Как видно, раздельное использование балансировки ПД или КР (сценарии 2 и 3) позволяет снизить среднюю задержку T по сравнению с отсутствием балансировки (сценарий 1).

Таблица 1.

Примеры параметров аппроксимации (9) для различных типов трафика

Тип модели узла ($G_{\text{вх}}$ / $G_{\text{вых}}$ / 1)	H	ρ_0	a	b	c
M/M/1 (экспоненц. вход, экспоненц. обслуживание)	0,5	1,0	1	1,0	1
W/M/1 (Вейбулл вход, экспоненц. обслуживание)	0,6	1,0	1	1,2	1
P/M/1 (Парето вход, экспоненц. обслуживание)	0,8	0,95	1	1,5	1
P/D/1 (Парето вход, детерм. обслуживание)	0,8	0,98	1	1,4	1

Таблица 2.

Результаты для разных сценариев балансировки

Сценарий	Балансировка ПД	Балансировка КР	T , мс (ср. задержка)
1. Нет балансировки	Нет	Нет	15,0
2. Только балансировка ПД	Да	Нет	12,0
3. Только балансировка КР	Нет	Да	10,0
4. Совместная балансировка	Да	Да	8,0

Наибольший эффект достигается при совместной балансировке (сценарий 4), когда T минимизируется благодаря одновременному перераспределению трафика и пропускной способности каналов в сети.

Пример оптимизации

В целях иллюстрации возможностей модели рассмотрим оптимизацию распределения трафика между двумя маршрутами для одной пары узлов. Пусть для данного направления связи доступны два маршрута с различными характеристиками: первый маршрут имеет меньшую задержку распространения, но ограниченную пропускную способность, а второй – большую пропускную способность, но более длинный (большая $\tau_{\text{расп}}$). Будем изменять долю α трафика, направляемого по первому маршруту, от 0 до 100 %. На рисунке 3 показана зависимость средней задержки τ_k (для фиксированного объема трафика) от доли α . При $\alpha = 0$ весь трафик идет по более длинному, но емкому второму маршруту; при $\alpha = 1$ – весь трафик по первому, узкому маршруту.

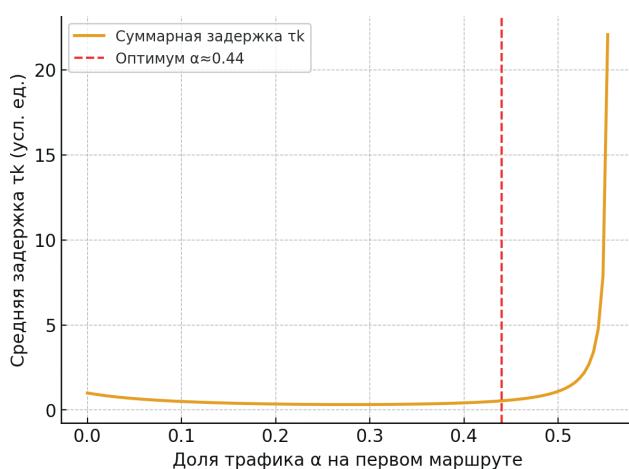


Рис. 3. Зависимость средней задержки τ_k от доли трафика α , направляемого по первому маршруту

Видно, что зависимость $\tau_k(\alpha)$ носит немонотонный характер: при малых α задержка высока из-за использования длинного маршрута, а при слишком больших α – из-за перегрузки на узком маршруте. Существует оптимальное значение $\alpha_{\text{opt}} \approx 0,44$ (в примере), при котором суммарная задержка минимальна (вертикальная линия на графике). Данный пример демонстрирует, как с помощью модели можно находить оптимальные доли распределения трафика по маршрутам. Аналогичным образом можно оптимизировать и распределение канального ресурса между путями.

Приведен пример для одного направления при фиксированной суммарной интенсивности трафика $\lambda_k = 9$ усл. ед., пропускная способность первого маршрута $g_1 = 5$ усл. ед., второго $g_2 = 10$ усл. ед. При малых α почти весь трафик идет по второму маршруту, загрузка которого $\rho_2 \approx 0,9$ приводит к заметному времени ожидания. При больших α трафик нагружает первый маршрут вплоть до состояния близкого к перегрузке ($\rho_1 \rightarrow 1$), резко увеличивая τ_k . Минимум суммарной задержки достигается при $\alpha_{\text{opt}} \approx 0,44$, обеспечивая компромисс между двумя альтернативами.

Таким образом, совместная балансировка – гибкое регулирование параметров α_{km} и γ_{rl} – позволяет значительно снизить задержки по сравнению с любым статическим (неоптимальным) распределением нагрузки.

Заключение

Представленная математическая модель мультисервисной транспортной сети связи с совместной балансировкой трафика и канального ресурса охватывает два уровня управления и все основные факторы, влияющие на задержки. Модель позволяет вычислять показатели средней задержки сообщений τ_k для любых заданных распределений потоков α_{km} и ресурсов γ_{rl} , а также обобщенный

показатель эффективности T . Использование аппроксимации $q(p)$ (формула (9)) дает возможность учесть различные статистические характеристики мультимедийного трафика, включая самоподобность. Численные эксперименты подтвердили адекватность модели: сценарии с совместной балансировкой дают наименьшие задержки, а модель корректно отражает влияние самоподобности трафика на рост времени ожидания. Разработанная модель может служить основой для

оптимизации распределения сетевых ресурсов и трафика. На ее базе могут формулироваться и решаться задачи выбора оптимальных параметров α_{km} , γ_{rl} , минимизирующих сетевые задержки при учете ограничений и приоритетов. Таким образом, предложенная модель способствует повышению эффективности функционирования мультисервисной транспортной сети связи за счет обоснованного управления как потоками данных, так и пропускной способностью каналов.

Литература

1. Одолевский, С. М. Оптимизация управления распределением трафика на смежных уровнях сетевой архитектуры / С. М. Одолевский, О. В. Яровикова // III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 25-26 февраля 2014. – С. 323–328.
2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
3. Сычев К. И. Многокритериальное проектирование мультисервисных сетей связи. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 272 с.
4. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. Лазарев В. Г., Лазарев В. Ю. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 216 с.
6. Степанов С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 394 с.
7. Одолевский С. М., Рафальская М. И., Зизевский В. А., Анищенко Г. И. Оптимизация распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования работы узлов коммутации мультисервисной сети связи в виде СМО // XI Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Сборник трудов. Казань: Издательство АН РТ, 2023. С. 663–673.
8. Одолевский С. М., Зизевский В. А., Рафальская М. И. Аппроксимация статистических характеристик процесса обслуживания мультимедийного трафика на основе логнормального распределения // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5 томах. Воронеж, 2024. С. 96–105.

MATHEMATICAL MODEL OF A MULTISERVICE TRANSPORT COMMUNICATION NETWORK WITH JOINT BALANCING OF MULTIMEDIA TRAFFIC AND CHANNEL RESOURCE

Zizevsky V. A.²

Keywords: multiservice network, mathematical model, self-similar traffic, joint balancing of multimedia traffic and channel resource.

Abstract

The purpose of the work is to develop and study a mathematical model of a multiservice transport communication network (MTSN), taking into account the joint balancing of multimedia traffic (MMT) and channel resources (CR), in order to improve the efficiency of the network and reduce network delays.

Research methods: theoretical-game and analytical-modeling approaches, optimization and simulation modeling methods, as well as comparative analysis of scenarios for the distribution of data flows

² Vadim A. Zizevsky, Adjunct of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia. E-mail: vaz94@mail.ru

and resources in networks were used. Statistical methods and approximation of simulation data were used to process the results obtained.

Results of the study: a universal mathematical model of MTSS with two-level control has been developed: the distribution of the channel resource at the lower level and data flows at the upper level. The model allows you to estimate the delays in the transmission of packets and identify the optimal options for balancing MMT and CR. Numerical experiments have shown that joint balancing (simultaneous redistribution of both flows and resources) provides minimum values of the average network delays and increases resistance to overloads. The energy gain is expressed in a 25-40% reduction in latency compared to traditional static distribution.

Scientific novelty: a generalized model of network delays for MTSS is proposed, taking into account self-similar traffic and various laws of distribution of packet intervals. It is shown that the use of joint balancing of PD and CR allows considering the statistical properties of traffic and significantly reducing the probability of overload on individual routes Simulation.

References

1. Odoevskij, S. M. Optimizacija upravljenja raspredeleniem trafika na smezhnyh urovnjah etevoj arhitektury / S. M. Odoevskij, O. V. Jarovikova // III Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija «Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii»: sbornik nauchnyh statej, Sankt-Peterburg, 25–26 fevralja 2014. – S. 323–328.
2. Klejnrok L. Vychislitel'nye sistemy s ocheredjami. – M.: Mir, 1979. – 600 s.
3. Sychev K. I. Mnogokriterial'noe proektirovanie mul'tiservisnyh setej svjazi. – SPb.: Izd-vo politehn. un-ta, 2008. – 272 s.
4. Vishnevskij V. M. Teoreticheskie osnovy proektirovanija komp'juternyh setej.– M.: Tehnosfera, 2003. – 512 s.
5. Lazarev V. G., Lazarev V. Ju. Dinamicheskoe upravlenie potokami informacii v setjah svjazi. – M.: Radio i svjaz', 1983. – 216 s.
6. Stepanov S. N. Osnovy teletrafika mul'tiservisnyh setej. – M.: Jeko-Trendz, 2010. – 394 s.
7. Odoevskij S. M., Rafal'skaja M. I., Zizevskij V. A., Anishhenko G. I. Optimizacija raspredelenija mul'timedijnogo trafika po neskol'kim marshrutam na osnove approksimacii rezul'tatov imitacionnogo modelirovanija raboty uzlov kommutacii mul'tiservisnoj seti svjazi v vide SMO // XI Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija po imitacionnomu modelirovaniju i ego primeneniju v nauke i promyshlennosti. Sbornik trudov. Kazan': Izdatel'stvo AN RT, 2023. S. 663–673.
8. Odoevskij S. M., Zizevskij V. A., Rafal'skaja M. I. Approksimacija statisticheskikh harakteristik processa obsluzhivaniya mul'timedijnogo trafika na osnove lognormal'nogo raspredelenija // Radiolokacija, navigacija, svjaz'. Sbornik trudov XXX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. V 5 tomah. Voronezh, 2024. S. 96–105.

