

УДК 378; 681.3

## Формализация показателей качества функционирования телекоммуникационных сетей нового поколения

Медведев Н. В.<sup>1,\*</sup>, Свистун А. И.<sup>2</sup>

[\\*medvedevnick54@yandex.ru](mailto:medvedevnick54@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> Белорусский Национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

В рамках международного научного конгресса "Наука и инженерное образование. SEE-2016", II международная научно-методическая конференция «Управление качеством инженерного образования. Возможности вузов и потребности промышленности» (23-25 июня 2016 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия).

Работа посвящена проблематике организации и поддержания эффективного информационного взаимодействия территориально распределенных средств и структур. Рассмотрена и проанализирована телекоммуникационная сеть нового поколения, представленная в виде аналитической модели, позволяющей оптимизировать такие показатели, как быстродействие, надежность и стоимость. Решена задача формализации показателей качества при проектировании архитектуры сетей. Задача оптимизации обобщенного показателя функционирования сети заключается в варьировании структурными и техническими параметрами, характеризующими быстродействие и надежность при ограничениях, накладываемых на стоимость сети.

**Ключевые слова:** телекоммуникационная сеть, локальная вычислительная сеть, протокол межсетевого взаимодействия, узел сети, качество обслуживания, эталонная модель взаимодействия открытых систем, виртуальные частные сети, инжиниринг трафика

### Обозначения и сокращения

АС – абонентская станция, узел сети  
ЛВС – локальная вычислительная сеть  
ПРК – процедура разрешения конфликта  
ТКС – телекоммуникационная сеть  
ЭМВОС – эталонная модель взаимодействия открытых систем  
ALOHA – метод случайного доступа с разрешением конфликтных ситуаций  
ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) – технология асинхронного режима переноса/передачи данных  
CSMA (*carrier sensitive multiple access*) – множественный доступ с контролем носителя

CSMA CD (*carrier sensitive multiple access with collision detection*) – множественный доступ с контролем носителя и обнаружением конфликтов  
FRR (*Fast ReRoute*) – механизм быстрой перемаршрутизации  
IP (*Internet Protocol*) – протокол межсетевого взаимодействия, основа транспортных средств стека протоколов TCP/IP  
MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) – многопротокольная коммутация по меткам  
QoS (*Quality of Service*) – качество обслуживания  
TE (*Traffic Engineering*) – инжиниринг трафика  
VPN (*Virtual Private Network*) – виртуальные частные сети

## Введение

В настоящее время во всем мире решаются проблемы создания глобального информационного общества. В России принята федеральная программа, предусматривающая широкое внедрение информационных технологий в рамках государственных проектов, что является необходимым условием реализации национальной стратегии перехода к ускоренному экономическому развитию и решению ряда социальных задач. Реализация программы требует организации и поддержания эффективного информационного взаимодействия территориально распределенных средств и структур.

Со стороны потребителей к информационному обмену предъявляется ряд требований, основными из которых являются [1, 5, 11, 12]:

- ✓ Обеспечение передачи заданного объема информации;
- ✓ Доставка сообщений по заданному адресу;
- ✓ Своевременность доставки сообщений;
- ✓ Обеспечение заданной достоверности доставки информации;
- ✓ Сохранение конфиденциальности информации;
- ✓ Техничко-экономическая эффективность;
- ✓ Соблюдение установленной дисциплины обслуживания абонентов.

Для объективной оценки качества сервисов, предоставляемых сетью, пользователи и поставщики услуг используют характеристики качества сетевых услуг, позволяющие оценить тот или иной аспект качества. Анализ показывает, что все показатели являются взаимосвязанными.

Среди технологий реализации ТКС в настоящее время лидирует MPLS. Изначально задумывавшаяся как средство для упрощения сопряжения сетей IP и ATM, а также для снижения нагрузки на маршрутизаторы, MPLS достигла высокой популярности, благодаря реализованным на ее основе приложениям, таким как инжиниринг трафика TE (Traffic Engineering), виртуальные частные сети (VPN), Fast ReRoute (FRR), обеспечение качества обслуживания QoS (Quality of Service). Более того, именно реализация QoS, возможности MPLS VPN и TE вывели ее на лидирующие позиции.

MPLS - сети обеспечивают поддержку видео- и аудио-коммуникаций в режиме прямой трансляции между произвольно удаленными абонентами сети. Технологию MPLS в VPN отличает хорошая масштабируемость и естественная интеграция с сервисами протокола IP.

Одним из основных методов исследования ТКС на основе MPLS- технологии является метод аналитического моделирования, который сводится к построению аналитической модели, отражающей физические свойства исследуемой сети в виде математических объектов и отношений между ними. В основу управления такой сетью положена эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМВОС).

Объектом исследования в данной статье является телекоммуникационная MPLS сеть, представленная в виде аналитической модели, позволяющей оптимизировать такие показатели, как быстродействие, надежность и стоимость. Решена задача формализации показателей качества при проектировании архитектуры сетей.

## Параметры, характеризующие функционирование MPLS-сети

Для анализа процесса функционирования MPLS-сети задают следующие группы исходных параметров: технические, структурные, нагрузочные и стоимостные.

К техническим параметрам  $\{T\}$  относятся: длина такта –  $h$ , скорость распространения сигнала по каналам связи –  $v$ .

Структурными параметрами  $\{S\}$  MPLS-сети являются:

- число абонентных станций и узлов сети, топология;
- множество рассматриваемых методов доступа –  $R$ ;
- интенсивности отказов узлов сети и абонентских станций (АС) и каналов связи (КС);
- интенсивности восстановления АС и КС;
- показатели живучести;
- число приоритетов сообщений;
- число дополнительных шин для передачи сообщений;
- емкости выходных и входных буферных накопителей каждой АС.

К нагрузочным параметрам  $\{H\}$  относятся закон поступления (интенсивности) сообщений в АС, функции распределения длины передаваемых сообщений и функции распределения вероятностей, относящиеся к используемым методам доступа.

Стоимостными параметрами  $\{C\}$  являются стоимость АС –  $C_{AC}$ , стоимость КС –  $C_{КС}$ , стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации метода доступа –  $C_{дос.}$ , стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации системы приоритетов –  $C_{сис.пр.}$ , стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для передачи сообщений по дополнительным шинам –  $C_{доп. шины}$ .

## Показатели качества функционирования MPLS-сети

MPLS-сеть является сложной системой, функционирующей в условиях воздействия различных случайных факторов. Для нее характерно наличие большого числа взаимосвязанных элементов, сложность структуры и выполняемых функций. Все множество технических характеристик качества транспортных услуг сети как правило относят к одной из следующих групп:

- 1) производительность;
- 2) надежность.

В качестве показателей надежности и быстродействия MPLS-сети принимаются [1,2,13]:

- вероятность успешной передачи информации по каналам (каналу) связи  $E$ ;
- пропускную способность каналов (канала) связи  $\Pi$ ;
- среднее время доставки сообщений  $T_{дос.}$ ;
- среднее время доставки сообщений  $i$  - того приоритета  $T_i$  дос., где  $i = 1, m$ ,  $m$  – число приоритетов.

Пропускная способность каналов (канала) связи связана с вероятностью успешной передачи информации по каналам (каналу) связи следующим соотношением:

$$\Pi = jEb, \quad (1)$$

где  $j$  – число каналов связи,

$$b = \frac{1}{M(L)}$$

где  $L$  – длина сообщений.

Нетрудно показать, что среднее время доставки сообщений зависит от пропускной способности каналов (канала) связи следующим образом:

$$T_{\text{дос}} = (1 - P_0) / \Pi, \quad (2)$$

где  $P_0$  – вероятность события, заключающегося в отсутствии сообщений в ЛВС.

Основным методом повышения надежности сетей [3,4] на этапе проектирования является введение избыточности (по числу элементов, времени исполнения задания, требуемой информации), называемой резервированием. Так при независимых отказах и нагруженном резерве из  $x_i = 0, 1, \dots$  изделий  $i$  – го типа  $i=1, \dots, m$ , вероятность безотказной работы сети равна:

$$E(x_1, \dots, x_m) = \prod_{i=1}^m [1 - (1 - E_i)^{x_i+1}], \quad (3)$$

где  $E_i$  – вероятность безотказной работы изделий  $i$  – го типа в течение заданного времени. При  $z_i$  – «вес» изделия  $i$  – го типа, а  $Z$  – ограничения на суммарный вес изделий задача оптимального резервирования состоит в отыскании среди всех наборов  $(x_1, \dots, x_m)$ , удовлетворяющих ограничению

$$\sum_{i=1}^m z_i x_i \leq Z, \quad (4)$$

набора  $(x_1^*, \dots, x_m^*)$ , определяющего максимальное значение вероятности безотказной работы  $E(x_1, \dots, x_m)$ . Если  $x_i^* = 0$ , то резерв по элементам данного типа не требуется [6].

Стоимость разработки ЛВС определяется следующим образом:

$$C = NCAC + jCKC + jC_{\text{дос.}} + C_{\text{сис. пр.}} + C_{\text{доп. шин}}, \quad (5)$$

где  $CAC$ ,  $CKC$ ,  $C_{\text{дос.}}$ ,  $C_{\text{сис. пр.}}$ ,  $C_{\text{доп. шин}}$  – стоимостные параметры,

$j$  – число каналов связи;

$N$  – число АС.

Стоимостными параметрами  $\{C\}$  являются стоимость АС –  $CAC$ , стоимость КС –  $CKC$ , стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации метода доступа –  $C_{\text{дос.}}$ , стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации системы приоритетов –  $C_{\text{сис. пр.}}$ , стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для передачи сообщений по дополнительным шинам –  $C_{\text{доп. шины}}$ .

Среднее время доставки сообщений и стоимость разработки зависят от значений технических, структурных нагрузочных и стоимостных параметров сети:

$$T_{\text{дос}} = f(\{T\}, \{S\}, \{H\}, \{C\}) \quad (6)$$

$$C = C(\{T\}, \{S\}, \{H\}, \{C\})$$

Итак, основными показателями эффективности функционирования сети является среднее время доставки сообщений (среднее время доставки сообщений  $i$ -того приоритета,  $i = 1, \dots, m$ ), надежность и стоимость ее разработки.

Выбранные показатели имеют ясный физический смысл, что позволяет их использовать при постановке и решении задачи анализа функционирования MPLS-сети.

В качестве обобщенного показателя [7,8,14], характеризующего эффективность сети, целесообразно взять произведение основных показателей эффективности, т.к. пользователи ЛВС заинтересованы в их минимальных значениях, а показатели надежности и быстродействия являются взаимосвязанными:

$$\Phi = T_{\text{дос}} * C = \Phi(\{T\}, \{S\}, \{H\}, \{C\}) \quad (7)$$

Задача оптимизации обобщенного показателя  $\Phi$  заключается в минимизации  $\Phi$  путем варьирования структурными и техническими параметрами, характеризующими быстродействие и надежность при ограничениях, накладываемых на стоимость сети.

### Математическая постановка задачи оптимизации

Математическая постановка задачи оптимизации на основе выбора метода доступа сводится к следующему.

Известны:

- множество  $\{T1\}$  технических параметров сети (длина такта -  $h$ );
- множество  $\{S1\}$  структурных параметров сети ( $N$  – число узлов АС в ЛВС, топология  $G$  – «шина»,  $R$  – множество рассматриваемых методов доступа: ALOXA, синхронная ALOXA,  $p$  – CSMA,  $p$  – CSMA – CD и маркерный метод доступа);
- множество  $\{H1\}$  нагрузочных параметров сети ( $q$  – вероятность прихода сообщений в выходной буферный накопитель каждой АС за время такта  $h$ ,  $L$  – длина сообщения, распределения по гипергеометрическому закону с математическим ожиданием
- $M[L] = 1/b$ , функции распределения  $F$ , относящиеся к рассматриваемым методам доступа);
- множество  $\{C1\}$  стоимостных параметров ( $CAC$  – стоимость АС,  $CKC$  – стоимость шины,  $C_{\text{дос. } i}$  – стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации  $i$  – того метода доступа, где  $i \in R$ ).

Необходимо найти такой метод доступа  $r^* \in R$ , при котором обобщенный показатель эффективности  $\Phi = T_{\text{дос}} * C$  принимал бы минимальное значение [16] при следующих ограничениях:

- среднее время доставки сообщений  $T_{\text{дос}}$  не превышает заданного значения  $T_{\text{зад}}$ ;
- стоимость разработки ЛВС  $C$  не превышает заданного значения  $C_{\text{зад}}$ ;
- емкости выходных буферных накопителей каждой АС  $V_- = 1$ ;
- емкости входных буферных накопителей каждой АС  $V_+ = \infty$ ;

Итак, заданы  $\{T1\}$ ,  $\{S1\}$ ,  $\{H1\}$ ,  $\{C1\}$  и необходимо найти  $r^* \in R$ , обеспечивающий

$$\min \Phi = T_{\text{дос}} * C = \Phi(r^*) \quad (8)$$

при ограничениях:  $T_{\text{дос}} \leq T_{\text{зад.}}$ ,  $C \leq C_{\text{зад.}}$

$$V_- = 1, V_+ = \infty$$

Состояние канала:

$k = 0$  – канал свободен;

$k = 1$  – состояние успешной передачи информации по каналу;

$k = 2$  – состояние конфликта (для случайных методов доступа) или передача маркера (для детерминированного метода доступа);

$k = 3$  – состояние искаженной передачи информации по каналу (это состояние только для случайных методов доступа ALOXA и синхронная ALOXA);

$k = 4$  – состояние прерывания успешной передачи информации по каналу (это состояние только для случайных методов доступа – ALOXA и n - CSMA).

Тогда основные показатели функционирования сети [6], приведенные выше, определяются следующими выражениями:

Среднее время доставки сообщений:

$$T_{\text{дос}} = \frac{(1 - P_i(0,0))}{b \cdot E} \quad (\text{в единицах такта } h), \quad (9)$$

$P_i(i,1)$  – финальная вероятность нахождения сети в состоянии  $(i, 1)$ ,  $i = \overline{1, N}$

$P_i(0,0)$  – финальная вероятность нахождения ЛВС в состоянии  $(0,0)$ .

Стоимость разработки ЛВС:

$$C = NCAC + CKC + C_{\text{дос}}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что формула (1) не справедлива для случайных методов доступа ALOXA и n-CSMA, поскольку они позволяют прерывать успешную передачу сообщений [17].

## Заключение

В качестве показателей качества для оптимизации и анализа при проектировании архитектуры MPLS-сетей задаются технические, структурные, нагрузочные и стоимостные параметры. Основными техническими характеристиками качества транспортных услуг сети являются производительность (быстродействие) и надежность.

В качестве показателей надежности и быстродействия MPLS-сети приняты вероятность успешной передачи информации по каналам связи, пропускная способность каналов связи, среднее время доставки сообщений с учетом их приоритетности. Основным экономическим показателем эффективности сети является стоимость разработки ТКС.

Среднее время доставки сообщений зависит от вероятности успешной передачи информации по каналам связи и пропускной способности каналов связи, что отражает взаимосвязь показателей быстродействия и надежности MPLS-сети.

Анализ маршрутизации трафика в MPLS – сетях, применяемых в транспортной инфраструктуре научно-образовательных сетей, сводится к анализу разрешения конфликтов и оптимизации на основе выбора метода доступа, определения резерва и определения времени доставки сообщений [18].

Математическая постановка задачи оптимизации сводится к оптимизации обобщенного показателя эффективности сети при варьировании техническими, структурными, нагрузочными параметрами с учетом стоимостных ограничений.

## Список литературы

- [1]. БЭС, Большой энциклопедический словарь. Математика. М.: Изд-во "Большая Российская энциклопедия". 1998. 847 с. С. 269.
- [2]. Спортак М., Паппас Ф., Рензинг Э. Компьютерные сети и сетевые технологии. Минск: Изд-во БНТУ. 2013. 350 с.
- [3]. Романов А.И. Основы теории телекоммуникационных сетей. Киев: КПИ. 2002. 152с.
- [4]. Башлы П.Н. Современные сетевые технологии. Учебное пособие. М.: Горячая линия – Телеком. 2006. 334 с.
- [5]. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4 изд. СПб.: Питер. 2010. 944 с.
- [6]. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир. 1989. 544 с.
- [7]. Шиндер Д.Л. Основы компьютерных сетей. М.: Вильямс. 2003. 651 с.
- [8]. Дансмор Б., Скандьер Т. Справочник по телекоммуникационным технологиям. М.: Вильямс. 2004. 628 с.
- [9]. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS. М.: Вильямс. 2004. 474 с.
- [10]. Резников Б.А. Анализ и оптимизация сложных систем. Планирование и управление в АСУ: Учебное пособие. Л.: ВИКИ.1981. 148 с.
- [11]. Глушков В.М., Амосов Н.М., Артеменко И.А. и др. Энциклопедия кибернетики / Отв. ред. Глушков В.М. В 2-х т. Т.1. Киев: Главная редакция Украинской Советской Энциклопедии. 1974. 608 с.
- [12]. Глушков В.М., Амосов Н.М., Артеменко И.А. и др. Энциклопедия кибернетики / Отв. ред. Глушков В.М. В 2-х т. Т.2. Киев: Главная редакция Украинской Советской Энциклопедии. 1974. 624 с.
- [13]. Флейшман Б.С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. М.: Советское радио. 1971. 224 с.
- [14]. Бусленко Н.П., Калашников Н.Н., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. Учебное пособие. М.: Советское радио. 1973. 441 с.
- [15]. Leelanivas M., Rekhter Y., Aggarwal R. RFC 3478 Graceful Restart Mechanism for Label Distribution Protocol. February 2003. Режим доступа: <http://www.rfc-base.org/rfc-3478.html> (дата обращения: 7.07.2016)
- [16]. Семенов Ю.А. Telecommunication technologies - телекоммуникационные технологии (v5.1, 15 июня 2014 года). Режим доступа: <http://book.itep.ru/> (дата обращения: 7.07.2016)
- [17]. Библиотека on-line / сайт CITforum. Режим доступа: <http://citforum.ru/> (дата обращения: 7.07.2016)
- [18]. Интуит - национальный открытый университет / сайт. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/> (дата обращения: 7.07.2016)