
**ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ
ТРУДЫ УЧЕНЫХ КАФЕДРЫ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

УДК 004.72

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕГМЕНТА АРХИТЕКТУРЫ
ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ**

Мочалов В.П., Линец Г.И., Палканов И.С.

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ

E-mail: ilya0693@yandex.com

Представлено описание фрагмента архитектуры программно-конфигурируемых сетей с учетом функциональности сетевых коммутаторов и контроллеров в виде математической модели многофазной системы массового обслуживания с потерями на каждой из фаз. В рекомендациях Инженерного совета Интернета draft Address Resolution Delay in SDN, Сектора радиокommunikаций Международного союза электросвязи М.2083-0 отмечается необходимость снижения сетевой задержки в пределах одного сегмента программно-конфигурируемой сети с 50 до 1 мс. Существенное влияние на данный показатель оказывают характеристики программно-аппаратного комплекса сети, процессы взаимодействия коммутаторов и контроллера. Однако время обслуживания и связанные с ним задержки обработки потоков пакетов не регламентируются производителями коммутационного оборудования (например, коммутатора Cisco Catalyst 3750), что затрудняет определение вероятностно-временных характеристик сети при проектировании, формализацию предложений по улучшению функционирования ее элементов. Предлагаемые модели разработаны на основе классической теории систем массового обслуживания и преобразований Лапласа. Получены зависимости среднего времени обслуживания и среднего числа пакетов в сети от нагрузки сетевых устройств, а также выражения, позволяющие определить средние доли потерь сетевых пакетов на каждой из фаз их обработки коммутатором.

Ключевые слова: *программно-конфигурируемая сеть, протокол Open Flow, сетевой контроллер, коммутатор, трехфазная модель системы массового обслуживания, преобразования Лапласа*

Введение

Архитектура компьютерных сетей, основанная на стандартных технологиях, при которой средства управления сетью и передачи трафика используют единую системную логику, реализованную на базе единых сетевых устройств и наборов средств по обеспечению требуемого качества обслуживания QoS, не соответствует скорости внедрения новых услуг и новых приложений. Такую сеть сложно конфигурировать при реализации выбранной сетевой политики, а также при изменении нагрузки и структуры. Она не обеспечивает необходимые минимальные задержки передачи пакетов, проприетарные протоколы взаимодействия устройств требуют существенных временных затрат, а нарастающая сложность сетевых устройств приводит к необходимости решения задач, связанных с внедрением новых протоколов и технологий, существенно увеличивает время и стоимость разработки [1–4; 7].

Для устранения данных проблем и упрощения управления сетью был предложен подход программно-конфигурируемых сетей SDN, отличительной особенностью которых является введение единого центра управления, принимающего решения по обработке сетевого трафика,

и передача функций управления от сетевого коммутатора к сетевой операционной системе централизованного контроллера. Типовой вариант фрагмента архитектуры SDN-сети представлен на рисунке 1. Здесь сетевая политика, реализация новых типов услуг (например, облачных сервисов) осуществляется приложениями, расположенными поверх контроллеров. Совокупность приложений осуществляет функции как управления сетью (маршрутизации, управления пропускной способностью и потоками пакетов, распределения нагрузки, организации межсетевых экранов, поиска кратчайшего пути и механизмов безопасности), так и реализуют функции в интересах бизнес-задач.

Сетевая операционная система контроллера SDN постоянно обновляет свои внутренние данные о топологии сети, устанавливает правила модификации счетчиков и наборов записей о потоках, состоянии элементов сети, маршрутах передачи данных, формирует и добавляет соответствующие записи в коммутаторы по каналам передачи данных, модифицирует правила управления в таблицах потоков коммутаторов.

Алгоритмы управления реализуются приложениями и сетевой операционной системой кон-

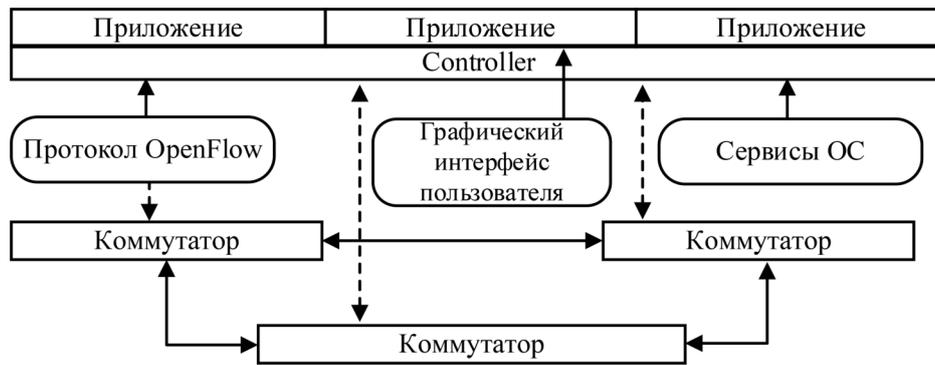


Рисунок 1. Типовой вариант архитектуры SDN-сети

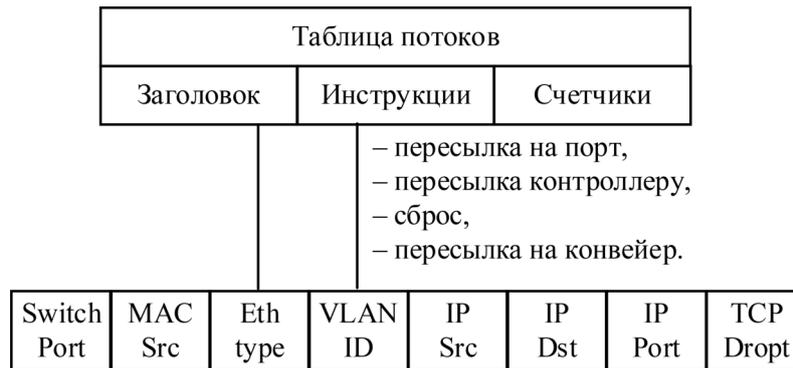


Рисунок 2. Структура набора записей коммутатора

троллера. Архитектура контроллера может быть как централизованной, так и распределенной, представляющей собой кластер узлов, или пространственно-распределенный набор многоядерных процессоров [5; 6; 9].

Взаимодействие контроллера с коммутаторами SDN-сети осуществляется посредством протокола OpenFlow. При этом осуществляются выбор отдельных пакетов с одинаковым сервисом сетевой политики из общего трафика, формирование из них потоков пакетов и определение соответствующих инструкций для маршрутизаторов. Сетевые коммутаторы содержат таблицы переходов, групповые таблицы потоков, алгоритмы и инструкции перераспределения пакетов: пересылки на следующую по номеру таблицу, на один из выходных портов или на управляющий вход контроллера и обеспечивают защищенный канал для связи с удаленным контроллером [7; 8].

Протокол конвейера обработки обеспечивает последовательную пересылку информации о пакетах, а обмен данными при этом может осуществляться как по специальной сети управления, так и по существующей транспортной сети. Каждая запись в таблице потоков состоит из полей-признаков, счетчиков и набора инструкций, обеспечивающих преобразования, определяемые набором инструкций, указанных в найденном правиле. В информационных полях потоков пак-

тов содержится информация о номерах и адресах портов абонентов сети, типе пересылаемых пакетов, идентификаторах и приоритетах пакетов, типе протокола и т. д.

Структура набора записей коммутатора приведена на рисунке 2 [9]. Сетевой коммутатор выполняет операции по обработке пакетов, по управлению потоками пакетов, по взаимодействию с другими элементами фрагмента сети. Операции над потоками пакетов можно разделить на этапы: прием коммутатором пакетов от абонентов, проверка наличия записей о поступивших потоках пакетов в таблицах адресации, пересылка запросов контроллеру, принимающему решение по обработке пакетов.

При поступлении входных пакетов коммутатор проверяет соответствия адреса поступившего пакета записям в таблицах потоков, выполняет инструкции, связанные с данным пакетом, и передает пакет на указанный исходящий порт для дальнейшей его отправки получателю (см. рисунок 3). Если соответствия адресов не установлено, то пакет отправляется контроллеру, который определяет правила его обработки и устанавливает их в таблицах адресации коммутатора.

Контроллер выполняет операции определения активных коммутаторов, соответствующих портов на коммутаторах, связи с коммутаторами через прокси-сервер FlowVisor, формирует логику

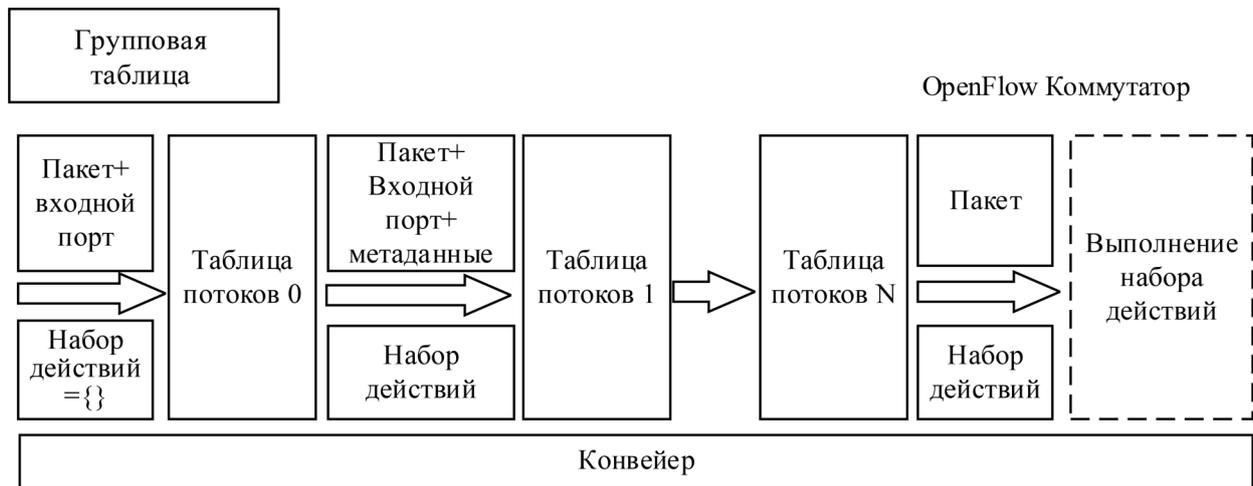


Рисунок 3. Состав таблиц адресации коммутатора SDN

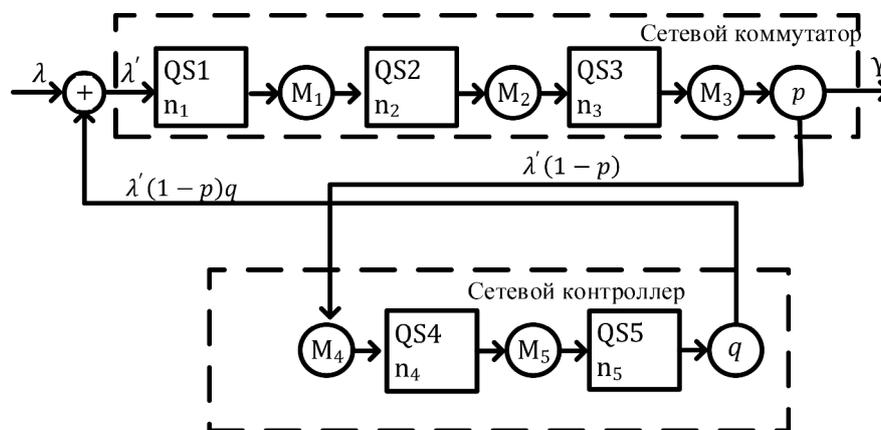


Рисунок 4. Модель фрагмента архитектуры SDN-сети

реализации алгоритмов коммутации и маршрутизации, производит внесение изменений в таблицы адресации. Основными уровнями OpenFlow контроллера является уровень взаимодействия с сетью; уровень обработки OpenFlow сообщений; уровень обработки событий; уровень сетевых сервисов и внутренних приложений; интерфейс для сетевых приложений; уровень сетевых приложений.

Очевидно, что реализация данных системных операций является одним из источников существенного снижения производительности сети. Поэтому показателями качества функционирования программно-аппаратного комплекса сети SDN могут являться задержки и потери пакетов, возникающие на различных этапах взаимодействия сетевых элементов. Решение данных задач возможно путем разработки моделей функционирования соответствующего оборудования, определения и исследования его основных вероятностно-временных характеристик.

В статье предлагается модель фрагмента программно-конфигурируемой сети, разработанная на основе теории массового обслуживания и по-

зволяющая находить основные вероятностно-временные характеристики процессов взаимодействия коммутаторов и контроллера SDN.

Методология исследования

На рисунке 4 изображена модель фрагмента архитектуры SDN-сети в виде многофазной системы массового обслуживания. Узлами сети являются многоканальные системы массового обслуживания с неограниченным ожиданием. Коммутатор и контроллер представлены соответственно трехфазной и двухфазной системами массового обслуживания при пуассоновском входящем потоке и экспоненциальных временах обслуживания на всех фазах.

На вход коммутатора поступает поток заявок-пакетов с интенсивностью λ . Обслуженная заявка с вероятностью p покидает сеть, а с вероятностью $(1-p)$ (вероятность того, что информации о пакете нет в таблице потоков) переходит в узел-контроллер. Заявка, обслуженная в узле-контроллере, с вероятностью q возвращается на вход коммутатора и после повторного обслуживания в этом узле покидает сеть.

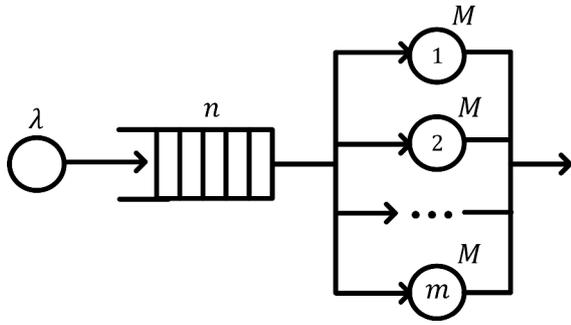


Рисунок 5. Структурная схема СМО типа $M | M | m | n$

Если потоки заявок пуассоновские, а времена обслуживания распределены экспоненциально на всех фазах, то процессы, протекающие в СМО, можно представить как марковские случайные с дискретными состояниями и непрерывным временем. Единственное требование к потокам заявок и их обслуживаний – это стационарность. Для стационарной работы рассматриваемой многофазной системы массового обслуживания должны совместно выполняться следующие условия

$$u_1 = \frac{\lambda(1+q-pq)}{n_1 M_1} < 1; \quad u_2 = \frac{\lambda(1+q-pq)}{n_2 M_2} < 1;$$

$$u_3 = \frac{\lambda(1+q-pq)}{n_3 M_3} < 1; \quad u_4 = \frac{\lambda(1-p)}{n_4 M_4} < 1;$$

$$u_5 = \frac{\lambda(1-p)}{n_5 M_5} < 1.$$

Известно, что подобную многофазную систему массового обслуживания можно анализировать как последовательность m -узловых СМО с n -местным буфером (см. рисунок 5).

Очевидно, что среднее время пребывания пакета-заявки в СМО1, в соответствии с формулами Эрланга, будет равно

$$\bar{t}_1 = (p_1 + \bar{r}_1)\lambda'^{-1} = \frac{1}{M_1} + \frac{p_1^{n_1+1} P_{0_1}}{n_1 n_1! (1-U_1)^2 \lambda'}, \quad (1)$$

где $p_1 = \frac{\lambda'}{M_1}$;

$$P_{0_1} = \left[1 + \frac{p_1}{1!} + \frac{p_1^2}{2!} + \dots + \frac{p_1^{n_1}}{n_1!} + \frac{p_1^{n_1+1}}{n_1 + n_1! (1-U_1)} \right]^{-1}.$$

Аналогично рассчитываем величины \bar{t}_2 и \bar{t}_3 для СМО2 и СМО3, при $\lambda_2 = \lambda'$ и n_2, M_2, n_3, M_3 . Тогда среднее время обслуживания заявки в СМО1, СМО2, СМО3 выглядит как

$$\bar{T}_{1-3} = \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3. \quad (2)$$

Среднее время обслуживания заявки в СМО4 будет равно

$$\bar{t}_4 = (p_4 + \bar{r}_4)\lambda'^{-1} = \frac{1}{M_4} + \frac{p_4^{n_4+1} P_{0_4}}{n_4 n_4! (1-U_4)^2 \lambda'}, \quad (3)$$

где

$$P_{0_4} = \left[1 + \frac{p_4}{1!} + \frac{p_4^2}{2!} + \dots + \frac{p_4^{n_4}}{n_4!} + \frac{p_4^{n_4+1}}{n_4 + n_4! (1-U_4)} \right]^{-1}.$$

Аналогично рассчитываем величину \bar{t}_5 для СМО5. Тогда среднее время обработки заявки в СМО4 и СМО5 будет равно

$$\bar{T}_{4-5} = \bar{t}_4 + \bar{t}_5. \quad (4)$$

При больших значениях n вероятности состояний можно вычислять через табулированные функции [15]

$$P(n, a) = \frac{a^n}{n!} e^{-a}; \quad R(n, a) = \sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} e^{-a};$$

$$Q(n, a) = 1 - R(0, a);$$

$$P(n, a) = Q(n-1, a) - Q(n, a);$$

$$P(0, a) = 1 - Q(0, a).$$

Например, при $n=8, a=5$ табличное значение вероятности $Q(n, a) = 6,8094 \cdot 10^{-2}$. Взаимодействие контроллера и коммутатора в соответствии с правилом функционирования протокола OpenFlow предполагает, что любая заявка-пакет с вероятностью $(1-p)$ исключается из потока (см. рисунок 4). Тогда интенсивность выходного потока рассчитывается как

$$\Upsilon = \lambda'(1-p) = \lambda' \sum_{i=0}^{m+n-1} p_i. \quad (5)$$

Используя представленные выше формулы Эрланга [2], получаем:

$$P_0 = \frac{p}{\sum_{k=0}^m \frac{p^k}{k!} + \frac{p^{m+1}}{mm!} \frac{1 - \left(\frac{p}{m}\right)^n}{1 - \frac{p}{m}}}; \quad (6)$$

$$P_{m+n} = \frac{\frac{p^m}{m!} \left(\frac{p}{m}\right)^n}{\sum_{k=0}^m \frac{p^k}{k!} + \frac{p^{m+1}}{mm!} \frac{1 - \left(\frac{p}{m}\right)^n}{1 - \frac{p}{m}}}; \quad (7)$$

$$P_{m+n} = \frac{\frac{p^m}{m!} \left(\frac{p}{m}\right)^n}{p} P_0. \quad (8)$$

Исходя из этого, интенсивность выходного потока заявок на выходе коммутатора представляет собой

Таблица 1. Зависимость интенсивности потока пакетов от p при $m = 5, n = 3$

p	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
Υ	100	200	263	478	745	971	1461	1876

Таблица 2. Зависимость доли потерянных пакетов от λ при $p = 0,75$

λ	100	200	300	500	800	1000	1500	2000
$\frac{Z_1(t)}{\lambda t}$	0,015	0,017	0,021	0,025	0,028	0,031	0,037	0,041
$\frac{Z_2(t)}{\lambda t}$	0,012	0,012	0,013	0,015	0,018	0,021	0,027	0,029
$\frac{Z_3(t)}{\lambda t}$	0,000	0,000	0,010	0,012	0,013	0,015	0,016	0,017

$$\Upsilon = \lambda' \left(1 - \frac{\frac{p}{m!} \left(\frac{p}{m}\right)^n}{p} P_0 \right). \quad (9)$$

Последовательное обслуживание потоков пакетов в сетевом коммутаторе, формализуемом трехфазной системой массового обслуживания, может привести к их возможным потерям на каждой из трех фаз. Считаем, что $P_i(1/\lambda', n, n_1M_1, n_2M_2, n_3M_3)$ – вероятность потери пакета на i -й фазе обслуживания. Тогда, используя результат, полученный в [14; 15], вычисляем:

$$P_{i+1}(1/\lambda', n, n_1M_1, n_2M_2, n_3M_3) = \iint_{U,V} M_1^2 e^{-n_1M_1(U+V)} \times P_i(1/\lambda' + V + U; n - 1; M_2, M_3) dudv, \quad (10)$$

где U и V – промежутки времени между соседними моментами поступающих пакетов полученного потока. Применив к полученному выражению преобразование Лапласа [12], получаем:

$$P_{i+1}(S, n, n_1M_1, n_2M_2, n_3M_3) = n_1M_1^2 \int_0^\infty e^{-n_1M_1(U+V)} \int_0^\infty e^{-Sr} \int_0^r e^{-n_1M_1U} \times P_i(r + V + U; n - 1; n_2M_2, n_3M_3) du = \frac{n_1M_1^2}{S + n_1M_1} \int_0^\infty e^{-(n_1M_1-S)V} dv \int_0^\infty e^{-Sr} \times P_i(r; n - 1; n_2M_2, n_3M_3) du = \frac{M_1^2}{S^2 M_1^2} [P_i(M_1; n - 1; M_2, M_3) - P_i(S; n - 1; M_2, M_3)]. \quad (11)$$

Из определенного в [16; 20] выражения для полного математического ожидания можно получить среднее число пакетов, потерянных на каждой из трех фаз коммутатора за время его функционирования при начальном условии $P_i(r; n; M_1, M_2, M_3) = e^{-M_1}$:

$$Z_i(t) = \sum_{r=2}^t \frac{(\lambda t)^r}{r!} e^{-\lambda t} \times \left[\sum_{j=1}^{r-1} \int_0^t \varphi_r^{j, j+1}(r; t) P_i(r; n; n_2M_2, n_3M_3) dr \right], \quad (12)$$

где

$$\varphi_r^{j, j+1}(r; t) = \frac{r}{t} \left(1 - \frac{r}{t} \right)^{r+1};$$

i – номер поступившего пакета; r – число поступивших пакетов ($j + 1 \leq r$).

Результаты моделирования фрагмента SDN-сети с учетом возможных потерь приведены в таблицах 1, 2. В реальных сетях ресурсы сетевых элементах ограничены, каждый пакет сформированного потока характеризуется случайным объемом, а время его обслуживания в стационарном режиме пропорционально объему и распределено по геометрическому закону.

Известно, что при достаточно больших объемах сообщений допустима замена геометрических (дискретных) распределений экспоненциальными (непрерывными) $L(x) = 1 - e^{-fx}$ с теми же средними значениями. Для приближенных оценок объема входного буфера коммутатора будем использовать зависимости, связывающие объем пакетов, время их обслуживания и вероятность потерь.

Преобразование Лапласа – Стильтеса (ПЛС) функции распределения объема обслуживаемого коммутатором сообщения $R(x)$ [10; 11]

$$l_i(s) = 1 - \frac{a_i}{g_i} \left[\frac{1}{f} + \frac{f}{(s+f)^2} \right], \quad (13)$$

где i – номер приемного канала; a_i – интенсивность входного потока ($i = \overline{1, m}$); $g_i > 0$ – время приема сообщения по i -му каналу; f – параметр функции распределения (ФР) объема сообщения. Отсюда первые два момента объема требования:

$$l_{1i} = \frac{2a_i}{g_i f^2} = \frac{2\rho_i}{f}, \quad l_{2i} = \frac{2a_i}{g_i f^3} = \frac{6\rho_i}{f^2}, \quad (14)$$

где ρ_i – нагрузка i -го канала; $(l_{2i} - l_{1i}^2) = \frac{2\rho_i}{f^2} (3 - 2\rho_i)$.

Тогда ПЛС стационарного суммарного объема сообщений будет равно

$$\delta(s) = \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \frac{a_i}{g_i} \left[\frac{1}{f} + \frac{f}{(s+f)^2} \right] \right\}. \quad (15)$$

Следовательно, среднее значение и дисперсия суммарного объема сообщений:

$$\delta_1 = \frac{2}{f} \sum_{i=1}^m \rho_i, \quad (\delta_2 - \delta_1^2) = \frac{2}{f^2} \sum_{i=1}^m \rho_i (3 - 2\rho_i). \quad (16)$$

Определить объем памяти V коммутатора можно с учетом известного выражения для вероятности потерь сообщения [14–16]

$$p_{\Pi} = 1 - R(V), \quad (17)$$

где

$$R(V) = \int_0^V D(V-x) dL(x), \quad L(x) = 1 - e^{-fx}$$

– ФР объема сообщения; $D(x) = p(\delta < x)$ – ФР стационарного суммарного объема сообщений δ . Первые два момента ФР равны

$$r_1 = \delta_1 + \varphi_1, \quad r_2 = \varphi_2 + 2\varphi_1\delta_1 + \delta_2, \quad (18)$$

где $\varphi_1 = 1/f$ – средний объем сообщения; δ_1, δ_2 – моменты суммарного объема сообщений. Для решения уравнения (17) можно воспользоваться выражением [13]:

$$D(V) = p_0 + (1 - p_0) \frac{\gamma(p, gx)}{\Gamma(p)}, \quad (19)$$

где p_0 – вероятность непоступления требований, гамма-распределения задаются выражениями:

$$\gamma(p, gx) = \int_0^{gx} t^{p-1} e^{-t} dt, \quad \Gamma(p) = \gamma(p, \infty),$$

а их параметры p и g определяются как

$$p = \frac{r_1^2}{r_2 - r_1^2}, \quad g = \frac{r_1}{r_2 - r_1^2}. \quad (20)$$

При анализе служебной части пакетов и формировании потоков считаем, что требование обслуживается мгновенно при идентификации

пакета, в противном случае задержка описывается экспоненциальным распределением с параметром p . ФР времени обслуживания входного потока пакетов при этом будет иметь вид $B(t) = p + (1-p)(1 - e^{-pt})$, а ее ПЛС будет иметь вид

$$\beta(q) = p + \frac{(1-p)p}{p+q} = \frac{p(1+q)}{p+q}, \quad (21)$$

откуда получим среднее значение времени обслуживания

$$\beta_1 = -\beta'(0) = \frac{1-p}{p}. \quad (22)$$

Если нагрузка системы определяется как $\rho = a\beta_1 = a(1-p)/p$, то ПЛС времени ожидания обслуживания определится как

$$W(q) = \frac{(1-\rho)(p+q)}{p+q-a(1-\rho)} = \frac{(1-\rho)(p+q)}{q+p(1-\rho)}. \quad (23)$$

Среднее значение времени ожидания равно

$$W_1 = -W'(0) = \frac{\rho}{p(1-\rho)}. \quad \text{Известно, что если изо-}$$

бражение имеет вид рациональной дроби $\frac{A_n(p)}{B_n(p)}$,

а P_1, P_2, \dots, P_n – корни кратности r_1, r_2, \dots, r_n так, что

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = m, \quad (24)$$

$$B_m(p) = \beta_0 (p - P_1)^{r_1} (p - P_2)^{r_2} \dots (p - P_n)^{r_n}, \quad (25)$$

то оригинал может быть найден по формуле

$$f(t) = \sum \operatorname{Res} \left[\frac{A_n(p)e^{pt}}{B_m(p)} \right]. \quad (26)$$

Если корни знаменателя P_1, P_2, \dots, P_m являются простыми, то

$$f(t) = \sum \frac{A_n(P_k)}{B_m(P_k)} e^{P_k t}. \quad (27)$$

Тогда обращение ПЛС функции $W(q)$ будет определяться соотношением

$$W(t) = \sum \operatorname{Res} \left[\frac{(1-\rho)(\rho+q)}{q(q+p(1-\rho))} e^{qt} \right]. \quad (28)$$

Функция распределения случайной величины (СВ) U имеет вид

$$U(t) = p \{U < t\} = \int_0^t W(t-u) dB(u) = \int_0^t e^{-uw} W(t-u) dU, \quad (29)$$

где $B(t) = 1 - e^{-wt}$.

Для случая

$$p \{W > 0\} = 1 - W(0) = \frac{(n\rho)^n p_0}{n!(1-\rho)}$$

среднее значение стационарного времени ожидания будет равно

$$W_1 = EW = \int_0^{\infty} dW(t) = \frac{n^{n-2} \rho^n p_0}{\mu(1-\rho)^2 (n-1)!}. \quad (30)$$

Среднее значение стационарного времени обслуживания будет равно

$$U_1 = EU = \int_0^{\infty} t dU(t) = \beta_1 + T_1 = \frac{1}{\mu} + \frac{n^{n-2} \rho^n p_0}{\mu(1-\rho)^2 (n-1)!}, \quad (31)$$

где EW, EU – математические ожидания W и U . Для упрощения расчетов полученные случайные величины были аппроксимированы ФР:

$$Z(x) = p_0 + (1-p_0) \frac{\gamma(p, gx)}{\Gamma(p)},$$

где p_0 – стационарная вероятность отсутствия требований,

$$p = \frac{\delta_1^2}{(1-p_0)\delta_2 - \delta_1^2}, \quad g = \frac{(1-p_0)\delta_1}{(1-p_0)\delta_2 - \delta_1^2}, \quad (32)$$

где p, g – параметры гамма-распределения; $\delta_1, \delta_2 - \delta_1^2$ – первый момент и дисперсия суммарного объема сообщений.

Показатели качества передающей части коммутатора можно оценить следующими параметрами:

– время прерывания пакетов в системе

$$V = \frac{N}{m\mu(1-p_0)} = \frac{\sum_{k=0}^{m+n} kp_k}{m\mu(1-p_0)}; \quad (33)$$

– время ожидания пакетов в очереди

$$W = \frac{N_0}{m\mu(1-p_0)} = \frac{\sum_{k=m+1}^{m+n} (k-m)p_k}{m\mu(1-p_0)}; \quad (34)$$

– время обслуживания

$$T_{об} = V - W = \frac{\sum_{k=0}^{m+n} kp_k}{m\mu(1-p_0)} - \frac{\sum_{k=m+1}^{m+n} (k-m)p_k}{m\mu(1-p_0)} = \frac{1}{m\mu} + \frac{(m-1) \sum_{k=m}^{m+n} p_k + \sum_{k=2}^{m-1} (k-1)p_k}{m\mu(1-p_0)}. \quad (35)$$

Оценки требуемого объема памяти V коммутатора при заданной вероятности потери сообщения представлены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что существует оптимальный режим нагрузки для сети, при котором потери будут минимальны. Результаты аналитического моделирования процесса формирования потоков пакетов с использованием выражений (33), (34) приведены на рисунках 7, 8. Представленные графики определяют зависимости

Таблица 3. Результаты моделирования

V	ρπ		
	ρ = 0,4	ρ = 0,5	ρ = 0,7
20	0,093	0,171	0,279
30	0,017	0,083	0,073
40	0,0063	0,0038	0,017

динамических характеристик коммутатора от нагрузки для двух объемов сообщений $\delta_1 = 31,33 \cdot 10^3$ зн, $\delta_1 = 53,31 \cdot 10^3$ зн и дисперсии $\delta_2 - \delta_1^2 = 105,90 \cdot 10^6$ зн².

Из рисунка 6 видно, что зависимости носят степенной характер, начиная с некоторого значения нагрузки (в нашем случае 0,7), резко возрастает время ожидания. Большее среднее время ожидания наблюдается в случае меньшего объема сообщения. Из рисунка 7 видно, что при объеме сообщения $\delta_1 = 31,33 \cdot 10^3$ зн в характеристике наблюдается некий провал, то есть уменьшение времени обслуживания, при значении нагрузки 0,5. Для случая $\delta_1 = 53,31 \cdot 10^3$ зн провал менее выражен и соответствует значению нагрузки 0,7. Из этого можно сделать вывод о существовании некоего оптимального соотношения между объемом сообщения и временем обслуживания, которое можно вычислить, с использованием разработанных моделей (18) и (19).

Заключение

Авторами разработана и исследована математическая модель сегмента архитектуры программно-конфигурируемой сети, представленная в виде многофазной системы массового обслуживания с потерями, состоящая из последовательно соединенных узлов типа $M | M | m | n$. Для стационарного режима работы на основе формул Эрланга и преобразований Лапласа предложен метод расчета параметров фрагмента SDN-сети, получены выражения, позволяющие определить средние доли потерь пакетов на каждой из фаз их обработки коммутатором. Был сделан ряд допущений, позволивших рассматривать трехфазный коммутатор как однофазный с тремя независимыми потоками.

Используя представленную модель SDN, сетевые администраторы и планировщики могут формализовать функционирование элементов фрагмента сети, прогнозировать вероятные изменения производительности, возникающие в результате изменения трафика. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации компьютерных сетей, реализующих концепцию SDN.

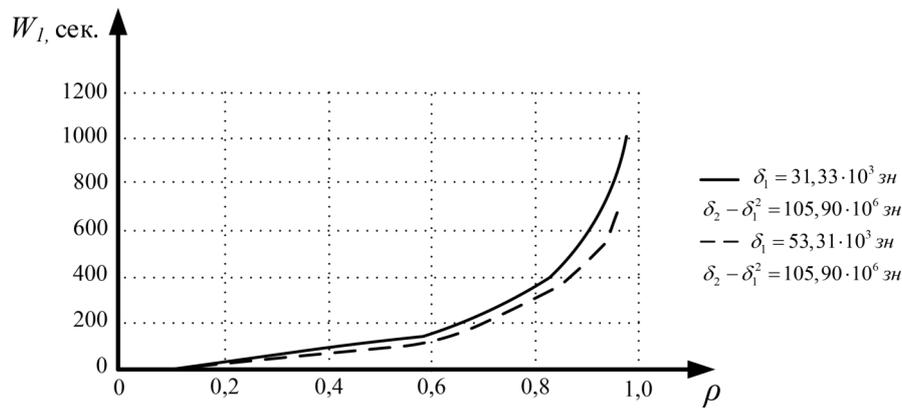


Рисунок 6. Зависимость среднего значения времени ожидания от нагрузки

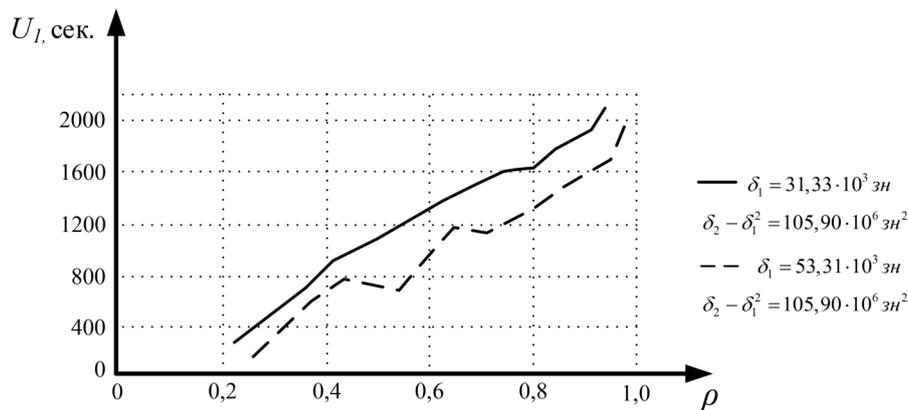


Рисунок 7. Зависимость среднего значения времени от нагрузки

Финансирование

Данные исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-07-00856\20.

Литература

1. Architecture SDN. Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org> (дата обращения: 17.03.2020).
2. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks. Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/whitepapers/wp-sdn-newnorm.pdf> (дата обращения: 21.03.2020).
3. OpenFlow Switch Specification, Version 1.3.0 (WireProtocol 0x04). Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onfspecifications/openflow/openflow-spec-v1.3.0.pdf> (дата обращения 21.03.2020).
4. Openflow Tutorial. URL: https://www.openflow.org/wk/index.php/OpenFlow_Tutorial (дата обращения 17.03.2020).
5. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y., Yakovlev S.V. Analytical model of integration system for program components of distributed object applications // International Russian Automation Conference 208, RusAutoCon. 2018. № 8501806. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018. 8501806.
6. FlowVisor: A Network Virtualization Layer. URL: <https://archive.openflow.org/downloads/technicalreports/openflow-tr-2009-1-flowvisor.pdf> (дата обращения 17.03.2020).
7. OpenFlow Switch Specification (Series). URL: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onfspecifications/openflow> (дата обращения: 26.03.2020).
8. Guillermo Romero de Tejada Muntaner. Evaluation of OpenFlow Controllers. URL: http://www.valleytalk.org/wpcontent/uploads/2013/02/Evaluation_Of_OF_Controllers.pdf (дата обращения: 26.03.2020).
9. Galicia Supercomputing Center. OpenFlow andSDN Technical Report. Technical Report CESGA-2014-001. URL: <https://www.cesga.es/en/biblioteca/id/754> (дата обращения: 17.03.2020).
10. OF-CONFIG 1.2. OpenFlow Management and Configuration Protocol. Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/>

- onf-specifications/openflow-config/of-config-1.2.pdf (дата обращения 26.03.2020).
11. Baldoni M., Varoglio M., Martelli A. Verifying the conformance of web services-to global interaction protocols: A first step // *International Workshop on WebServices and Formal Methods*. 2005. P. 27.
 12. Egawa T. SDN standardization Landscape from-ITU-T Study Group 13 // *ITU Workshop on SDN*. Geneva, Switzerland, 4 June 2013.
 13. Брауде Э.Дж. Технология разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2004. 642 с.
 14. Пугачев В.С. Введение в теории вероятностей. М.: Наука, 1968. 368 с.
 15. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 440 с.
 16. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y., Yakovlev S.V. Analytical model of object request broker based on Corba standard // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1015. № 2. P. 022012. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022012.
 17. Priya A.V., Radhika N. Performance comparison of SDN OpenFlow controllers // *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2019. Vol. 11. № 4/5. P. 467–479.
 18. Nageswara S.V. Rao Performance comparison of SDN solutions for switching dedicated long-haul connections // *ICN 2016: The Fifteenth International Conference on Networks*. 2016. P. 110–117.
 19. Bholebawa I.Z., Dalal U.D. Performance analysis of SDN/OpenFlow controllers: POX versus floodlight // *Wireless Personal Communications*. 2018. Vol. 98. № 2. P. 1679–1699. DOI: 10.1007/s11277-017-4939-z.
 20. Li T., Chen J., Fu H. Application scenarios based on SDN: An overview // *IOP Publishing. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1187. № 5. P. 052067. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/5/052067.

Получено 14.05.2020

Мочалов Валерий Петрович, д.т.н., профессор кафедры инфокоммуникаций (ИК) Северо-кавказского федерального университета (СКФУ). 355028, Российская Федерация, Ставропольский край, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2 (корпус 9). Тел. +7 865 295-69-97. E-mail: mochalov.valery2015@yandex.ru

Линец Геннадий Иванович, д.т.н., заведующий кафедрой ИК СКФУ. 355028, Российская Федерация, Ставропольский край, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2 (корпус 9). Тел. +7 865 295-69-97. E-mail: kbytw@mail.ru

Палканов Илья Сергеевич, аспирант кафедры ИК СКФУ. 355028, Российская Федерация, Ставропольский край, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2 (корпус 9). Тел. +7 865 295-69-97. E-mail: ilya0693@yandex.ru

ANALYTICAL MODEL FOR A FRAGMENT OF SDN ARCHITECTURE

Mochalov V.P., Linets G.I., Palkanov I.S.

North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

E-mail: ilya0693@yandex.com

A fragment of a Software-Defined Networking architecture with the functionality of switches and controllers is described as the mathematical model of a multiphase queueing system with losses at each phase. In the Internet Engineering Task Force draft *Address Resolution Delay in SDN* (also see *ITU Radiocommunication Sector M.2083-0*), it was recommended to reduce network delay within a single Software-Defined Networking segment from 50 to 1 ms. This performance index depends considerably on the characteristics of the software and hardware system of Software-Defined Networks, as well as on the processes of interaction between the switches and the controller. However, the service time and hence the processing delays for packet flows are not regulated by the suppliers of switching equipment (e.g., Cisco Catalyst 3750 switches), which makes it difficult to determine the probabilistic and time characteristics of networks during the design stage and to formalize any suggestions on improving the performance of network elements. The models presented in this paper are based on the classical queueing theory and Laplace transforms. In this case, the relation between

the stages of packets processing on network devices has little significance; therefore, the performance indices are obtained in terms of single-phase network parameters. The mean service time and the mean number of packets in a network are calculated as functions of the load of network devices. Also, analytical expressions for determining the mean loss ratio of network packets at each phase of processing by a switch are derived.

Keywords: *Software-Defined Networking, OpenFlow protocol, Software-Defined Networking controller, Software-Defined Networking switch, three-phase model of queueing systems, Laplace transform*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.2.05

Mochalov Valeriy Petrovich, North-Caucasus Federal University, 2 (building 9), Kulakov Avenue, Stavropol, Stavropol Territory, 355028, Russian Federation. Doctor of Technical Science, Professor of Infocommunication Department. Tel. +7 865 295-69-97. E-mail: mochalov.valery2015@yandex.ru

Linets Gennadiy Ivanovich, North-Caucasus Federal University, 2 (building 9), Kulakov Avenue, Stavropol, Stavropol Territory, 355028, Russian Federation. Doctor of Technical Science, Associate Professor, Head of Infocommunication Department. Tel. +7 865 295-69-97. E-mail: kbytw@mail.ru

Palkanov Ilya Sergeevich, North-Caucasus Federal University, 2 (building 9), Kulakov Avenue, Stavropol, Stavropol Territory, 355028, Russian Federation. PhD Student of Infocommunication Department. Tel. +7 865 295-69-97. E-mail: ilya0693@yandex.ru

References

1. *Architecture SDN*. OpenNetworking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org> (accessed: 17.03.2020).
2. *Software-Defined Networking: The New Norm for Networks*. Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/whitepapers/wp-sdn-newnorm.pdf> (accessed: 21.03.2020).
3. *OpenFlow Switch Specification, Version 1.3.0 (WireProtocol 0x04)*. Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onfspecifications/openflow/openflow-spec-v1.3.0.pdf> (accessed: 21.03.2020).
4. *Openflow Tutorial*. URL: https://www.openflow.org/wk/index.php/OpenFlow_Tutorial (accessed: 17.03.2020).
5. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y., Yakovlev S.V. Analytical model of integration system for program components of distributed object applications. *International Russian Automation Conference 2018, RusAutoCon 2018*, № 8501806. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501806.
6. *FlowVisor: A Network Virtualization Layer*. URL: <https://archive.openflow.org/downloads/technicalreports/openflow-tr-2009-1-flowvisor.pdf> (accessed: 17.03.2020).
7. *OpenFlow Switch Specification (Series)*. URL: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onfspecifications/openflow> (accessed: 26.03.2020).
8. *Guillermo Romero de Tejada Muntaner. Evaluation of OpenFlow Controllers*. URL: http://www.valleytalk.org/wpcontent/uploads/2013/02/Evaluation_Of_OF_Controllers.pdf (accessed: 26.03.2020).
9. *Galicia Supercomputing Center. OpenFlow and SDN Technical Report*. Technical Report CESGA-2014-001. URL: <https://www.cesga.es/en/biblioteca/id/754> (accessed: 17.03.2020).
10. *OF-CONFIG 1.2. OpenFlow Management and Configuration Protocol*. Open Networking Foundation. URL: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow-config/of-config-1.2.pdf> (accessed: 26.03.2020).
11. Baldoni M., Baroglio M., Martelli A., Verifying the conformance of web services to global interaction protocols: A first step. *International Workshop on WebServices and Formal Methods*, 2005, p. 27.

12. Egawa T. SDN standardization Landscape from ITU-T Study Group 13. *ITU Workshop on SDN*, Geneva, Switzerland, 4 June 2013.
13. Braude E.J. *Software Design: From Programming to Architecture*. Saint Petersburg: Piter, 2003, 642 p. (In Russian.)
14. Pugachev V.S. *Introduction to Probability Theory*. Moscow: Nauka, 1968, 368 p. (In Russian.)
15. Wetzel E.S., Ovcharov L.A. *Theory of Random Processes and Its Engineering Applications*. Moscow: Akademiya, 2003, 440 p. (In Russian.)
16. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y., Yakovlev S.V. Analytical model of object request broker based on Corba standard. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 2, p. 022012. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022012.
17. Priya A.V., Radhika N. Performance comparison of SDN OpenFlow controllers. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 2019, vol. 11, no. 4/5, pp. 467–479.
18. Nageswara S.V. Rao performance comparison of SDN solutions for switching dedicated long-haul connections // *ICN 2016: The Fifteenth International Conference on Networks*, 2016, pp. 110–117.
19. Bholebawa I.Z., Dalal U.D. Performance analysis of SDN/OpenFlow controllers: POX versus floodlight. *Wireless Personal Communications*, 2018, vol. 98, no. 2, pp. 1679–1699. DOI: 10.1007/s11277-017-4939-z.
20. Li T., Chen J., Fu H. Application scenarios based on SDN: An overview. *IOP Publishing. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, vol. 1187, no. 5, p. 052067. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/5/052067.

Received 14.05.2020

УДК 621.395.4

ПРОЦЕССНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ УСЛУГ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ TM FORUM FRAMEWORX

*Мочалов В.П., Линец Г.И., Братченко Н.Ю., Палканов И.С.
Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ
E-mail: ilya0693@yandex.com*

Системы управления телекоммуникациями решают задачи реализации высокотехнологичных услуг связи за счет интеграции сервисов различных провайдеров, учета ресурсов, управления услугами и их показателями качества, прогнозирования и обеспечения спроса на услуги. Из-за ограничений, связанных с необходимостью формирования новых инфокоммуникационных услуг, обеспечения гибкости и удобства их модификации, система поддержки операций / система поддержки бизнеса (Operation Support System / Business Support System) не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к системам управления будущими сетями (Future Networks). В основу предлагаемых методов построения системы управления положен процессный подход, базирующийся на открытой цифровой архитектуре (Open Digital Architecture) концепции Tele Management Forum Framework. Рассмотрены процессная модель системы эксплуатационного управления сетями и формальные постановки задач ее моделирования, а также предложена аналитическая модель, позволяющая оптимизировать ее загрузку. Путем использования аппарата полумарковских процессов, преобразований Лапласа и производящих функций получены оценки показателей качества услуг связи при реализации случайных объемов запросов на обслуживание.

Ключевые слова: *Operation Support System / Business Support System, услуга связи, Future Networks, Open Digital Architecture, Tele Management Forum Framework, Network Functions Virtualization, программные компоненты, процессорные модули*

Введение

Классический подход к проектированию телекоммуникационных сетей основан на использовании специализированных устройств (маршрутизаторов, коммутаторов, межсетевых экранов и др.).

Разработка сетей, состоящих из подобных монолитных элементов, требует выполнения длительных циклов пуско-наладочных работ, что замедляет ввод системы связи в эксплуатацию. При этом модификация существующих и развертыва-