

УДК 004.056, 004.722

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.017](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.017)

Постановка задачи оптимизации доступности в корпоративных программно-определяемых телекоммуникационных сетях

А.П. Матвеева

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Российская Федерация*

Резюме: Увеличение структурной сложности корпоративных телекоммуникационных сетей актуализирует вопросы обеспечения доступности предоставляемых ими сетевых сервисов. На данный момент основным способом повышения сетевой доступности является наращивание пропускной способности за счет внедрения в существующую сеть новых сетевых устройств и сегментов, что является неэффективной мерой, поскольку при этом не учитываются структурно-топологические характеристики сети. Цель данной работы – сформулировать задачу оптимизации доступности корпоративных программно-определенных телекоммуникационных сетей для разработки такого алгоритма перестройки топологии SDN, который будет адаптироваться под характеристики трафика внутри сети и обеспечивать оптимальный уровень доступности сети при существующих ограничениях. В результате работы алгоритма предлагается находить такую оптимальную виртуальную топологию (набор узлов и ребер), при которой при фиксированных значениях критериев доступности каналов связи значения доступности сети, рассчитываемые по описываемой методике оценки критерия доступности сети, были бы максимальными. Проведенный по описываемой методике оценки расчет показал, что увеличение количества ребер графа сети повышает доступность всей сети при фиксированном значении критерия доступности каналов связи, однако существует вероятность того, что бесконтрольное добавление связей внесет существенную нелинейность в изменение доступности уже существующих каналов связи, что требует дальнейшего исследования. Для того, чтобы выработать эффективный алгоритм оптимизации в условиях неопределенности и нелинейности, задача оптимизации была детерминирована путем ввода некоторых предположений.

Ключевые слова: доступность, программно-определяемая сеть, SDN, OpenFlow, топология сети.

Для цитирования: Матвеева А.П. Постановка задачи оптимизации доступности в корпоративных программно-определяемых телекоммуникационных сетях. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=970> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.017

A Problem Statement of Availability Optimization in Corporate Software-Defined Networks

A.P. Matveeva

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir, Russian Federation*

Abstract: The increase in the structural complexity of corporate telecommunication networks actualizes the ensuring the availability of the network services they provide issues. For the present, the primary way to increase network availability is to increase bandwidth by introducing new network devices and segments into the existing network, which is an ineffective measure since it does not take into account the structural and topological characteristics of the network. The purpose of this work is to formulate

the problem of optimizing the availability of corporate software-defined telecommunication networks to develop such an algorithm for rearranging the SDN topology, which will adapt to the characteristics of traffic within the network and ensure the optimal level of network availability under existing constraints. As a result of the algorithm operation, it is proposed to find such an optimal virtual topology (a set of nodes and edges) for which, with fixed values of the availability criteria of communication channels, the values of the network availability calculated according to the described method of assessing the network availability criterion would be maximum. The calculation performed according to the described assessment method showed that an increase in the number of edges of the network graph increases the availability of the entire network with a fixed value of the availability criterion of communication channels. However, there is a possibility that the uncontrolled addition of links will introduce significant nonlinearity in changing the availability of existing communication channels, which requires further research. To develop an effective optimization algorithm in conditions of uncertainty and nonlinearity, the improvement problem was determined by introducing certain assumptions.

Keywords: availability, software-defined networking, SDN, OpenFlow, network topology

For citation: Matveeva A. P. Problem Statement of Availability Optimization in Corporate Software-Defined Networks. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=970> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.017 (In Russ).

Введение

Проблема контроля доступности в информационно-телекоммуникационных системах приобретает в настоящее время все большее и большее значение. В стандартах, разрабатываемых МСЭ-R для сетей будущего (FN), наиболее критичной эксплуатационной характеристикой становится задержка, в частности, определена необходимость в снижении сквозной задержки передачи данных в сети с 10 мс до 1 мс [1, 2], также среди основных требований к применениям различных типов услуг фигурирует показатель «низкой» и «сверхнизкой задержки».

Современные корпоративные телекоммуникационные сети (КТС) характеризуются использованием все большего числа сетевых сервисов. Большинство из этих сервисов отличаются высокой интенсивностью трафика, и у корпоративной сети увеличиваются потребности в использовании полосы. По этой причине корпоративная телекоммуникационная инфраструктура вынуждена наращивать пропускную способность, однако зачастую такой рост осуществляется механически, путем ввода в действие новых сетевых устройств и сетевых сегментов. Главная задача при построении КТС – оптимизация обработки и распределения информационных потоков в условиях постоянно усложняющейся топологии, для чего применяют технологию виртуализации сетей. Все аппаратное и программное обеспечение в телекоммуникационной сети обрабатывается виртуальной сетью как единый набор ресурсов, чья доступность перестает зависеть от их физической локализации.

Технология VLAN (виртуальная локальная сеть) долгое время использовалась в корпоративных сетях как самое популярное решение для виртуализации сети. Из-за преимуществ, достигаемых при помощи VLAN, сетевые операторы и администраторы использовали ее для построения своих сетей до сих пор и даже расширили ее использование для управления сетью в системе облачных вычислений. Однако настройка VLAN остается утомительным, сложным и подверженным ошибкам процессом, поскольку сетевым администраторам необходимо вручную настраивать конфигурации множества отдельных сетевых устройств (например, коммутаторов) с помощью интерфейса командной строки на уровне устройства. Усложняет задачу также территориальная распределенность КТС, при которой сетевое оборудование может

располагаться как на разных этажах одного большого здания или нескольких зданий, так и вовсе в филиалах, находящихся в разных городах.

В качестве метода борьбы со все возрастающим усложнением администрирования сетей, а также ростом затрат на управление и эксплуатационные расходы рассматривают внедрение программно-определяемых сетей (SDN). Используя SDN, можно построить гибкую и централизованно настраиваемую сеть с существенно меньшими финансовыми затратами, которую удобнее администрировать, чем подобную сеть, построенную на традиционном стеке протоколов. С использованием подхода SDN администратор может изменять конфигурацию сети, задавать направление потоков трафика и масштабировать сеть.

Однако, несмотря на все преимущества новой технологии, возможности SDN по перестройке сетевой топологии в данный момент используются не до конца, в основном этим вручную занимаются сетевые администраторы, интеллектуальные ресурсы и время реакции которых ограничены и не позволяют им в полной мере использовать возможности, предоставляемые SDN.

Описание объекта исследования

Объектом настоящего исследования являются корпоративные программно-определяемые телекоммуникационные сети (КПТС). *Цель данной работы* – сформулировать задачу оптимизации доступности КПТС для разработки такого алгоритма перестройки топологии SDN, который будет адаптироваться под характеристики трафика внутри сети и обеспечивать оптимальный уровень доступности сети при существующих ограничениях.

Приводят следующее определение корпоративным телекоммуникационным сетям (КТС): это совокупность связанных между собой локальных сетей, охватывающих территорию, на которой размещено одно предприятие или учреждение в одном или нескольких близко расположенных зданиях. КПТС, в свою очередь, отличаются сложной распределенной сетевой инфраструктурой и, вследствие этого, применением технологии SDN для управления ей.

КТС свойственны следующие особенности, принципиальные в данном исследовании:

- территориальная распределенность, т. е. объединение офисов, подразделений и других структур, находящихся на значительном удалении друг от друга, в одну сеть;
- высокая степень разнородности телекоммуникационного оборудования и программного обеспечения, гетерогенность сети;
- большое разнообразие решаемых задач, и вследствие этого, разнородность сетевых сервисов с различными требованиями к эксплуатационным характеристикам телекоммуникационной сети;
- конвергентность, что означает, что от поставщика услуг связи трафик различного типа приходит по одному каналу передачи данных.

Типовая КТС включает несколько подсетей, выделяемых для изоляции трафика, сетевое оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы, защитные межсетевые экраны, точки беспроводного доступа), VPN каналы, мобильные устройства, канал доступа в сеть Интернет, сервера и рабочие станции. Корпоративная инфраструктура может быть сложно связана и покрывать большие территории.

Описанная схема актуальна при условиях фиксированной конфигурации, если же в КТС применяются SDN, то эта схема будет постоянно перестраиваться, но в то же

время сохранять черты типовой: сеть сегментирована, поэтому сохраняется необходимость в маршрутизации, есть изолированные сегменты, удаленные работники, которые подключаются через туннелирование, есть совокупность сервисов, которая в целом для КТС неизменна, изменяются при этом только топологические характеристики сети. Схема КПТС, похожей на типичную сеть небольшой компании, изображена на Рисунке 1.

Внедрение технологии SDN в корпоративную инфраструктуру предназначено для решения такой проблемы, что статическая архитектура традиционных сетей децентрализована и сложна, в то время как современные условия сети требуют большей гибкости и легкости устранения неполадок.

В технологии SDN предусмотрены разделение плоскости управления и плоскости данных, а также возможность сетевого программирования. Плоскость управления состоит из различных сетевых приложений, которые решают, как проходит трафик, а плоскость данных состоит из виртуализированных сетевых узлов, пересылающих данные и управляемых контроллером SDN через программируемые интерфейсы (например, посредством протокола OpenFlow). Таким образом, SDN упрощает управление сетью и её настройку, поскольку администраторам не нужно выполнять некоторые задачи конфигурирования на уровне устройства. Более того, сложная логика управления может быть задана путем написания программ, которые намного проще реализовывать, обновлять и поддерживать.

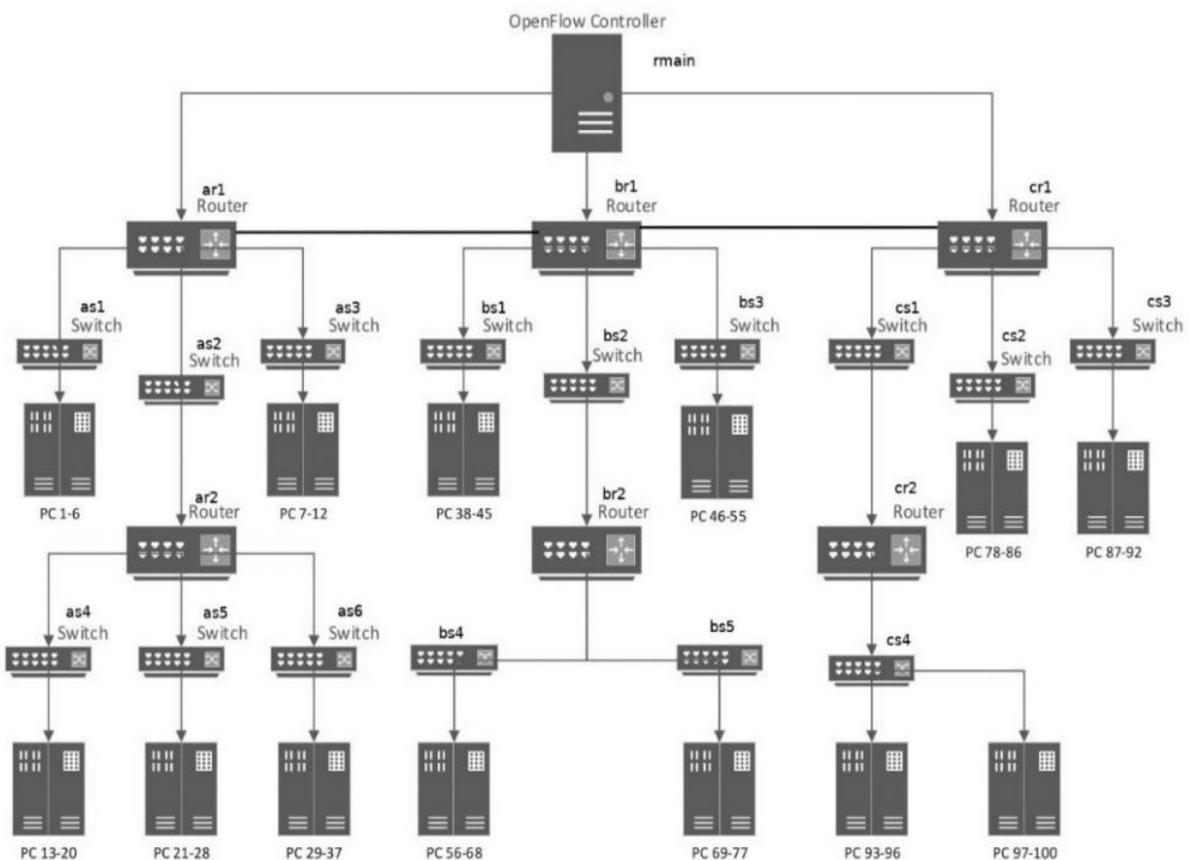


Рисунок 1 – Схема КПТС
 Figure 1 – Corporate SDN diagram

SDN обычно ассоциируется с протоколом OpenFlow (хотя на данный момент существуют и другие протоколы для удаленной связи с элементами плоскости данных). OpenFlow [3] был предложен в качестве стандартного протокола между коммутаторами и программным контроллером в архитектуре SDN. Через протокол OpenFlow контроллер поддерживает и обновляет записи потоков в таблицах потоков коммутаторов. Благодаря многочисленным преимуществам SDN и OpenFlow сетевые операторы внедряют их во многие типы телекоммуникационных сетей, такие как университетские и корпоративные сети, сети операторов связи и сети мобильной связи [4].

Степень разработанности темы

В связи с перспективностью данной парадигмы построения сетей, вопросам организации и управления SDN посвящено большое количество работ. В частности, в некоторых работах, например, [5-10] предлагается гибридное развертывание OpenFlow и SDN в традиционной корпоративной сети. Н. Lu [5] предложил структуру для автоматизированного сетевого управления гибридными сетями OpenFlow / SDN. Одним из вкладов этой работы является то, что она обеспечивает функциональность виртуализации сети для набора хостов с помощью VLAN. Levin D. [6] представил дизайн и реализацию сетевой архитектуры крупного предприятия, которая сочетает в себе традиционные коммутаторы и коммутаторы, поддерживающие SDN. Чтобы установить переход между SDN и традиционными сетями, авторы ввели специальные структуры SCT, в которых идентификаторы VLAN используются для направления трафика, отсылаемого к портам обычного коммутатора, к коммутаторам SDN.

Автор считает, что гибридный подход к построению корпоративной программно-определяемой сети (КПТС) является неэффективным, поскольку в таком случае масштабируемость SDN упирается в необходимость обеспечения прямого физического высокоскоростного доверенного канала связи между контроллером и коммутатором, что не всегда соответствует действительности при попытках перейти на новую сетевую инфраструктуру с уже имеющейся, используя прежнее оборудование.

Также неправильно сравнивать коммутаторы из традиционных сетей и сетей SDN, так как для работы с протоколом OpenFlow коммутатор должен обладать специальным портом для связи с контроллером для получения и выполнения инструкций, которого может не быть на уже имеющемся оборудовании в случае рассматривания возможности перехода на новую сетевую архитектуру.

Однако, и при построении SDN «с нуля» исследователи отмечают различные проблемы. Так, автор работы [11] отмечает, что задержки в сетях с программно-определяемой инфраструктурой, лежащие в основе генерации сообщений управления и выполнении управляющих операций могут быть достаточно высокими и переменными. Отмечено, что основополагающие причины заключаются в неэффективном программном обеспечении, организации правил переадресации и в контроле нагрузки. Также автор отмечает, что необходимо более тщательное проектирование устройств и программного обеспечения для того, чтобы использовать и раскрыть преимущества SDN в полную силу.

В результате анализа источников [12-15] можно выделить следующие факторы, влияющие на масштабируемость сетей SDN:

- вычислительная мощность контроллеров и устройств, организующих уровень передачи;
- ёмкость памяти и буфера;

- расположение контроллера в сети, что в некоторых исследованиях не оказывало никакого влияния на общую производительность, например, в [16], а в других при разных условиях наблюдался рост задержки;
- задержка между типами устройств контроллер-контроллер и контроллер-коммутатор;
- трафик в канале связи.

На уровне инфраструктуры сети, масштабируемость главным образом зависит от оборудования, недостаточность вычислительной мощности которых или нехватка памяти напрямую влияет на уровень качества обслуживания всей сети. В работах были проведены эксперименты по масштабируемости централизованных, децентрализованных вертикальных и горизонтальных распределенных типов уровней управления программно-определяемых сетей. Наилучшую масштабируемость показал децентрализованный вертикальный уровень управления, но также был замечен рост задержки.

Несмотря на растущую популярность SDN, анализ работ по предмету исследования позволил сделать вывод, что вопросами доступности сетей, использующих архитектурный принцип SDN, занимаются крайне мало. Есть ряд исследований, касающихся задержек при передаче пакетов, вычисления маршрута потоков и передачи управляющих сообщений от коммутаторов к контроллерам, в которых не затрагивается вопрос оценки доступности сети. Область, связанная с доступностью в SDN, практически не изучена. Также стоит отметить то, что топологии сетей авторов смежных работ либо изменялись незначительно, либо оставались неизменными, а многие исследования проводились на устаревших версиях протокола OpenFlow, что не позволяет в полной мере опираться на полученные в ходе данных работ результаты. Тем не менее, знание величины доступности сети позволяет повысить защищенность телекоммуникационной системы в целом уже на этапе ее разработки, а также обеспечить поддержку требований величины доступности для потребителей услуг сети в ходе ее эксплуатации.

Само понятие «доступность» (availability) по-разному используется в контексте терминологии. В отечественных официальных документах чаще всего этот термин используют применительно к таким объектам как информация, документ, ресурс. Однако, даже по отношению к одному и тому же объекту, ученые по всему миру по-разному трактуют данное понятие. Достаточно большое число авторов упоминают вместе с понятием доступность понятие надежность, поскольку эти понятия схожи, но меры различения каждый автор приводит свои.

Подходы к оценке величины доступности также различаются. Авторами [17-19] предлагаются различные методы для измерения доступности, одни предлагают качественные оценки, более понятные конечным пользователям телекоммуникационных систем, другие вычисляют уровень доступности количественно как соотношение времени простоя системы ко времени ее штатной работы.

Формализация задачи исследования

В данной работе под доступностью сети будем понимать вероятность того, что при заданной топологии сети определенные характеристики (сетевая связность, пропускная способность и т. д.) будут поддерживаться на приемлемом уровне, обеспечивая выполнение сетевых услуг с качеством не хуже заданного. Под качеством здесь понимается процент выполненных задач за приемлемое время (не превышающее директивного).

В свою очередь, доступность всей сети можно представить через доступность узлов (устройств) сети и доступность каналов связи между ними, где показатель доступности канала связи вычисляется по аналогии с надежностью в технических системах исходя из характера соединения на этом канале и вероятности отклика за время, меньшее или равное директивному устройств, которые входят в канал.

Модель КПТС будем представлять в виде ориентированного двунаправленного графа G , ребра которого обозначают наличие физического соединения между соседними вершинами – узлами (устройствами сети), графовый путь между любыми двумя несоседними вершинами образует канал связи. Тогда исследуемую сеть можно представить в виде следующего кортежа:

$$G = \{U, V, W, A\},$$

где $U = \{u\}$ обозначает множество узлов, $V = \{v\}$ – множество ребер, $W = \{w\}$ – множество каналов связи, $W \in V$, а A – множество весов ребер, в нашем случае обозначающих величину показателя доступности узла i из узла j , инцидентного ему.

Данная модель может отражать как физическую, так и логическую топологию КПТС, в нашем случае под узлами мы будем понимать виртуализированные на уровне контроллера SDN сетевые устройства (маршрутизаторы, коммутаторы), под ребрами – каналы связи, непосредственно связывающие два соседних таких устройства (Рисунок 2).

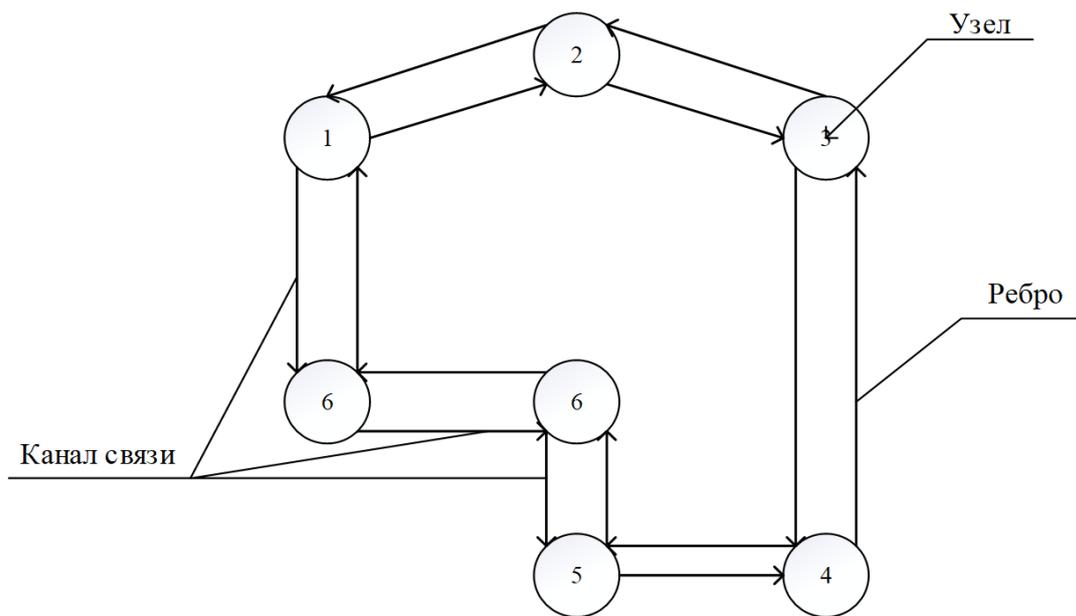


Рисунок 2 – Исследуемая модель КПТС
 Figure 2 – Network model under study

Каждый из узлов сети имеет некоторое количество присоединенных к нему ребер. Пусть их доступность зависит от механизмов распределения доступности на самом узле. Выделим два варианта таких механизмов [20]:

— узел i обладает доступностью A_i , которая по некоторому закону делится между всеми его исходящими ребрами, причем доступность ребер может меняться с течением времени.

— узел i обладает доступностью A_i и фиксирует величину отклика по ребру, т. е. доступность каждого из его исходящих ребер будет одинаковой в любой момент времени t .

В рамках текущего исследования применяется критерий доступности сети, предложенный Ю. М. Монаховым и его соавторами [21], включающий в себя понятие сетевой доступности и методику её оценки. В соответствии с методикой, доступность канала связи между двумя узлами, представляющего собой последовательное соединение узлов от истока к стоку, как показано на Рисунке 3, то следует воспользоваться формулой (1) для независимых событий из теории вероятностей:

$$A_{ij} = \prod_{k=1}^n A_k \quad (1)$$

где A_{ij} – доступность связи между узлом i и j ; A_k – доступность ребра, входящего в путь, который соединяет узлы i и j ; n – количество ребер, образующих путь из узла i в узел j .

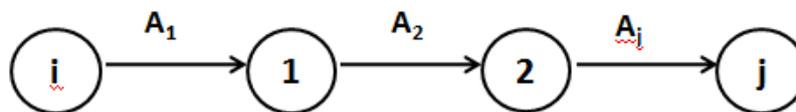


Рисунок 3 – Пример последовательного соединения узлов сети
 Figure 3 – An example of a serial connection of network nodes

Если количество возможных путей от одного узла до другого превышает единицу, тогда общая доступность канала между двумя узлами (i и j) рассчитывается с учетом всех возможных путей, которые ведут из вершины i в вершину j . Первым шагом определяют все возможные пути между вершинами i и j и находят доступность каждого из путей по формуле (1). Далее суммируются величины доступности всех найденных путей. Среднее арифметическое от суммы и будет величиной доступности связи между i и j .

Вводятся такие понятия как минимальная A_{min} и максимальная A_{max} доступности, т. е. в качестве критерия доступности будем рассматривать граничные значения. Минимальная доступность сети – доступность сети, когда большинство задач, выполняемых в рамках сети, осуществляется через каналы с минимальной доступностью. Максимальная доступность сети – доступность сети, когда большинство задач, выполняемых в рамках сети, осуществляется через каналы, соответственно, с максимальной доступностью.

Автор методики предлагает использовать следующий алгоритм [22] для определения доступности всей сети:

Шаг 1. Строим матрицу смежности T , которая заполнена величинами показателя доступности между соседними узлами, т. е. элемент матрицы $T[i][j]$ содержит величину доступности исходящего из узла i ребра и входящего в узел j . Если два узла не связаны друг с другом напрямую, то доступность принимаем равной нулю.

Шаг 2. При помощи модифицированного алгоритма Флойда-Уоршелла для каждой пары узлов определяем такой канал, доступность которого будет наименьшей (и наибольшей) по сравнению с другими каналами, соединяющими эти два узла.

Шаг 3. Для того, чтобы получить скалярную величину максимальной и минимальной доступности рассматриваемой сети, воспользуемся нормированным расстоянием Колмогорова между матрицами A_{max} и $A_{globalmax}$ и A_{min} и $A_{globalmax}$ соответственно, где $A_{globalmax}$ – единичная матрица, т. е. с абсолютно максимальной

доступностью всех каналов, A_{max} и A_{min} – матрицы с максимальными и минимальными доступностями каналов в данной сети, полученные на предыдущем шаге:

$$d_p(x, y) = \left(\int_0^1 (x(t) - y(t))^p dt \right)^{1/p} \quad (2)$$

Здесь $d_p(x, y)$ – расстояние между функциями x и y ;

$x = x(t)$ – функция, полученная из $A_{globalmax}$;

$y = y(t)$ – функция, полученная из A_{min} (A_{max});

t – произвольный вектор;

p – произвольный параметр ($p > 1$). Для упрощения формулы (2) можно принять $p = 2$.

Шаг 4. Нормируем полученную величину. Получаем:

$$- A_{\max(cemu)} = e^{-\frac{d(A_{\max}, A_{global\ max})}{d_{\max}(N)}}$$

$$- A_{\min(cemu)} = e^{-\frac{d(A_{\min}, A_{global\ max})}{d_{\max}(N)}}$$

где $d_{\max}(N)$ – полином третьей степени, вид которого выбирается в зависимости от N , N – число узлов в рассматриваемой сети.

Постановка задачи

Согласно данной методике, для повышения показателя доступности сети возможно два подхода:

(1) оптимизировать топологию КПТС для достижения максимума интегрального показателя доступности. Для этого мы либо максимизируем и A_{max} , и A_{min} , либо максимизируем их среднее значение;

(2) повысить показатель доступности канала связи A_{ij} .

Вопрос повышения показателя доступности канала связи находится за пределами данного исследования, ему посвящены другие наши работы. Постановка задачи данного исследования имеет следующий вид.

Дано: связный граф G , представленный в виде взвешенной матрицы смежности $T[i][j]$, где под весом понимается величина показателя доступности ребра (v_i, v_j) . Найти: такую оптимальную виртуальную топологию (набор узлов и ребер), при которой при фиксированных значениях показателей доступности A_{ij} каналов связи значения доступности сети A_{max} и A_{min} были бы максимальными. То есть, задача сводится к разработке алгоритма оптимизации доступности, который будет переводить исходное состояние графа в оптимальное.

Под оптимизацией топологии КПТС будем понимать комбинацию четырех возможных действий:

- (1) удаление узла сети;
- (2) удаление ребра между двумя узлами;
- (3) добавление узла;
- (4) добавление ребра между двумя узлами.

Удаление узла подразумевает также удаление его связей, если при этом нарушается связность графа, соседние с удаленным узлы нужно «перевязывать» между собой. Добавление узла сети влечет за собой добавление как минимум одного ребра, связывающего добавленный узел с одним из уже существующих. Интуитивно можно предположить, что добавление связей вплоть до получения полносвязного графа повысит интегральный показатель доступности сети. Действительно, результат расчета

по приведенной методике показывает обоснованность данного предположения. Рисунок 4 демонстрирует зависимость A_{max} и A_{min} сети от количества связей между узлами, расчет проводился на графе сети, матрица связности со значениями доступности ребер которой представлена в Таблице 1.

Таблица 1 – Значения доступности ребер
 Table 1 – The edge availability values

V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	0,87	0	0	0	0,87	0	0	0	0,87	0	0	0	0	0	0	0
2	0,89	1	0,89	0,89	0	0,89	0,89	0	0,89	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0,89	1	0,89	0	0	0,89	0	0	0	0,89	0,89	0,89	0	0	0	0
4	0	0,88	0,88	1	0,88	0,88	0	0	0	0	0,88	0	0,88	0	0	0	0
5	0	0	0	0,8	1	0	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0,8	0,8	0,8
6	0,92	0,92	0	0,92	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0,93	0,93	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,93	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0,93	0	0	1	0	0,93	0	0	0	0,93	0	0	0
9	0	0,97	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,98	0	0	0	0	0	0	0,98	0	1	0	0	0	0	0,98	0	0
11	0	0	0,9	0,9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,9	0	0
12	0	0	0,95	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0,93	0,93	0	0	0,93	0	0	0	0	0	1	0	0,93	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0,87	0	0	0	0	0	1	0,87	0	0
15	0	0	0	0	0,91	0	0	0	0	0,91	0,91	0	0,91	0,91	1	0	0
16	0	0	0	0	0,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	0,97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Однако, такой расчет не учитывает возрастание нагрузки на узлы, рост диаметра сети и прочие эффекты, оказывающие негативное влияние на доступность каналов связи. В небольшой сети ($N \leq 10$) такое влияние не будет велико, однако, с ростом количества узлов бесконтрольное добавление связей внесет существенную нелинейность в оценке доступности уже существующих каналов связи. Для того, чтобы выработать эффективный алгоритм оптимизации в условиях неопределенности и нелинейности детерминируем задачу оптимизации, приняв следующие предположения:

- расположение контроллера в сети не оказывает влияние на доступность;
- количество каналов, связанных с одним узлом, ограничено неким числом K , где $K \leq 10$;
- утверждение о том, что узел i обладает доступностью A_i и фиксирует величину отклика по ребру, верно до тех пор, пока степень вершины i $d(i) \leq K$;
- доступность канала связи (v_i, v_j) , образуемого при добавлении нового узла i к узлу j , прогнозируем исходя из доступностей каналов связи, образуемых между узлом j и смежными ему узлами. Действительное значение показателя доступности ребра (v_i, v_j) возможно получить только по результатам измерений, однако, в процессе принятия решения о действии (подключении нового узла) можно воспользоваться усреднением, в данном случае мы будем брать медианное значение.

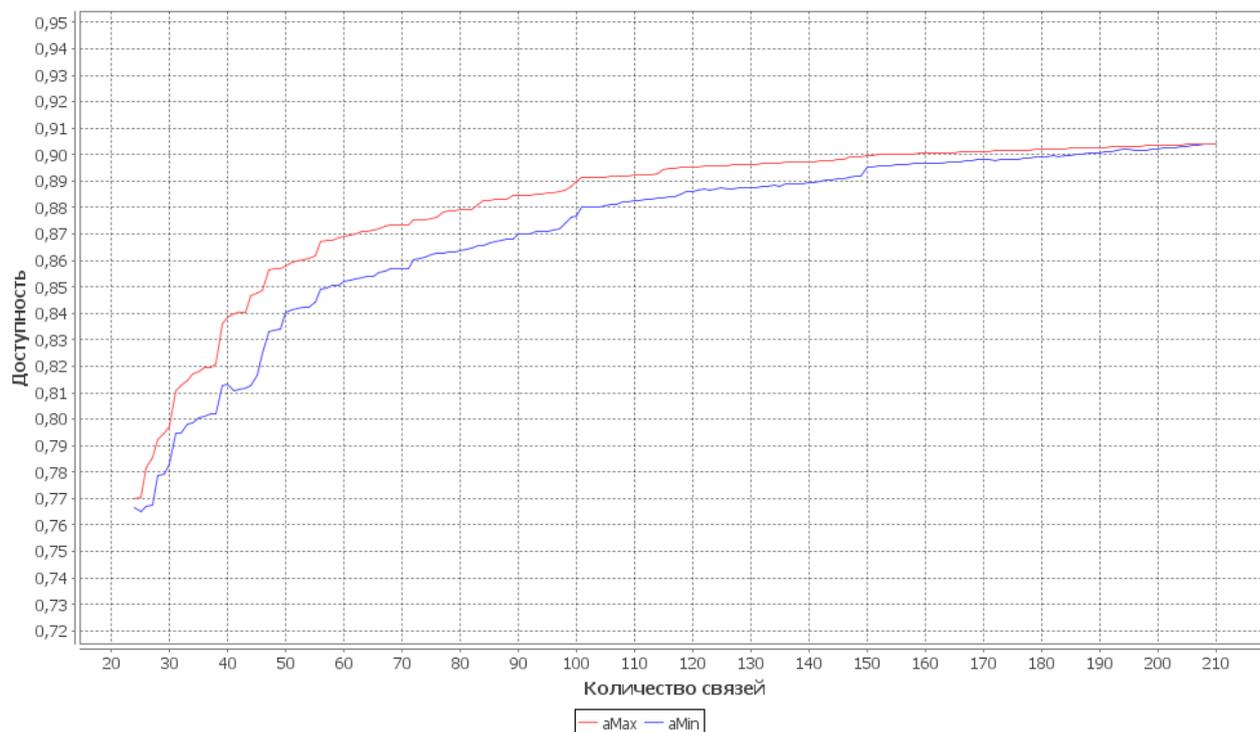


Рисунок 4 – Зависимость критерия доступности сети от количества ребер
 Figure 4 – Dependence of the criterion of network availability on the number of edges

Заключение

Ранее проведенное исследование [23] показало, что увеличение количества соединений между коммутационными устройствами является эффективным методом повышения доступности сети с реактивным режимом обработки входящих потоков, в то время как стратегия уменьшения количества устройств показала себя неэффективной. Однако, задача оптимизации доступности КПТС является более сложной и комплексной: необходимо учитывать топологические характеристики сети, не допускать рост радиуса сети и падение доступности уже существующих каналов связи при добавлении новых узлов, учитывать порядок присоединения или удаления узлов и каналов между ними и пр.

В дальнейшем планируется разработать алгоритм, оптимизирующий топологию КПТС для достижения максимума по доступности, а также провести экспериментальное исследование доступности КПТС в натуральных условиях. Результаты этого исследования предполагается использовать как основу для создания алгоритмов, автоматизирующих оценку доступности программно-определяемых сетей с любой сложностью каналов и любой динамикой их изменения, а также создания автоматизированных инструментов для проектирования и масштабирования телекоммуникационной инфраструктуры информационных систем высокой доступности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации, утверждена Приказом Минкомсвязи России от 27.12.2019 N 923.
2. Recommendation ITU-T Y.3100 Terms and definitions for IMT-2020 network.

3. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM computer communication review*. 2008;38(2):69-74.
4. Jarraya Y., Madi T., Debbabi M. A survey and a layered taxonomy of software-defined networking. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2014;16(4):1955-1980.
5. Lu H., Arora N., Zhang H., Lumezanu C., Rhee J., Jiang G. Hybnet: Network manager for a hybrid network infrastructure. *Proceedings of the Industrial Track of the 13th ACM/IFIP/USENIX International Middleware Conference*. 2013;1-6.
6. Canini M., Feldmann A., Levin D., Schaffert F., Schmid S. Software-defined networks: Incremental deployment with panopticon. *Computer*. 2014;47(11):56-60.
7. Nguyen V.G, Kim Y.H. SDN-based enterprise and campus networks: a case of VLAN management. *Journal of Information Processing Systems*. 2016;12(3):511-524.
8. Yamasaki Y., Miyamoto Y., Yamato J., Goto H., Sone H. Flexible access management system for campus VLAN based on OpenFlow. *In 2011 IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet*. 2011;347-351.
9. Lara A., Kolasani A., Ramamurthy B. Simplifying network management using software defined networking and OpenFlow. *In 2012 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. 2012; 24-29.
10. Tsai P. W., Cheng P. W., Yang C. S., Luo M. Y., Chen J. Supporting extensions of VLAN-tagged traffic across OpenFlow networks. *2013 Second GENI Research and Educational Experiment Workshop*. 2013;61-65.
11. Егоров В.Б. Некоторые вопросы практической реализации концепции SDN. *Системы и средства информатики*. 2016;26(1):109-120.
12. Yeganeh S.H, Tootoonchian A., Ganjali Y. On scalability of software-defined networking. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(2):136-141.
13. Bhandarkar S., Behera G., Khan K. A. Scalability Issues in Software Defined Network (SDN): A Survey. *Advances in Computer Science and Information Technology (ACSIT)*. 2015;2(1):81-5.
14. Hu J. Lin C., Li X., Huang J. Scalability of control planes for software defined networks: Modeling and evaluation. *2014 IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service (IWQoS)*. 2014;147-152.
15. Oliveira A.T., Martins B.J.C., Moreno M.F., Vieira A.B., Gomes A.T.A., Ziviani A. SDN-based architecture for providing QoS to high performance distributed applications. *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. 2018;602-607.
16. Badotra S., Singh J. A review paper on software defined networking. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2017;8(3):17.
17. Haddad S., Mokdad L., Youcef S. Response time analysis for composite Web services. *2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. 2008;506-510.
18. Cabarkapa M., Mijatovic D., Krajnovic N. Network topology availability analysis. *Telfor Journal*. 2011;3(1):23-7.
19. Zhu H. Reliability and availability analysis for large networking system. *2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 2012;1-6.
20. Монахов Ю.М., Власова А.М. Методика определения доступности компонентов одноранговой сети со сложной случайной топологией. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2015(4):150-153.
21. Monakhov Y.M., Monakhov M.Y., Lantsov V.N. An algorithm for assessing the availability criteria in telecommunication networks. *International Journal of Computing*. 2018;17(4):219-225.

22. Монахов Ю.М., Власова А.М. Методика расчета нормированного критерия доступности телекоммуникационной сети. *Динамика сложных систем-XXI век*. 2015;9(3):73-77.
23. Monakhov Y., Kuznetsova A., Mamaev D. An Approach for Managing Availability in Software Defined Network Infrastructure. *2020 IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*. 2020;1-6.

REFERENCES

1. Concept of creation and development of 5G / IMT-2020 networks in the Russian Federation.
2. Recommendation ITU-T Y.3100. Terms and definitions for IMT-2020 network.
3. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S. and Turner J. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM computer communication review*. 2008;38(2):69-74.
4. Jarraya Y., Madi T., Debbabi M. A survey and a layered taxonomy of software-defined networking. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2014;16(4):1955-1980.
5. Lu H., Arora N., Zhang H., Lumezanu C., Rhee J., Jiang G. Hybnet: Network manager for a hybrid network infrastructure. *Proceedings of the Industrial Track of the 13th ACM/IFIP/USENIX International Middleware Conference*. 2013;1-6.
6. Canini M., Feldmann A., Levin D., Schaffert F., Schmid S. Software-defined networks: Incremental deployment with panopticon. *Computer*. 2014;47(11):56-60.
7. Nguyen V.G., Kim Y.H. SDN-based enterprise and campus networks: a case of VLAN management. *Journal of Information Processing Systems*. 2016;12(3):511-524.
8. Yamasaki Y., Miyamoto Y., Yamato J., Goto H., Sone H. Flexible access management system for campus VLAN based on OpenFlow. *2011 IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet*. 2011;347-351.
9. Lara A., Kolasani A., Ramamurthy B. Simplifying network management using software defined networking and OpenFlow *2012 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. 2012;24-29.
10. Tsai P.W., Cheng P.W., Yang C.S., Luo M.Y., Chen J. Supporting extensions of VLAN-tagged traffic across OpenFlow networks. *2013 Second GENI Research and Educational Experiment Workshop*. 2013;61-65.
11. Egorov V.B. Nekotoryye voprosy prakticheskoy realizatsii kontseptsii SDN [Some issues of practical implementation of the SDN concept]. *Sistemy i sredstva informatiki [Systems and means of informatics]*. 2016;26(1):109-120 (in Russian).
12. Yeganeh S.H., Tootoonchian A., Ganjali Y. On scalability of software-defined networking. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(2):136-141.
13. Bhandarkar S., Behera G., Khan K.A. Scalability Issues in Software Defined Network (SDN): A Survey. *Advances in Computer Science and Information Technology (ACSIT)*. 2015;2(1):81-85.
14. Hu J., Lin C., Li X., Huang J. Scalability of control planes for software defined networks: Modeling and evaluation. *2014 IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service (IWQoS)*. 2014;147-152.
15. Oliveira A.T, Martins B.J.C., Moreno M.F., Vieira A.B., Gomes A.T.A., Ziviani A. SDN-based architecture for providing QoS to high performance distributed applications. *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. 2018;602-607.
16. Badotra S., Singh J. A Review Paper on Software Defined Networking. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2017;8(3):17.

17. Haddad S., Mokdad L., Youcef S. Response time analysis for composite Web services. *2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*. 2008;506-510.
18. Cabarkapa M., Mijatovic D., Krajnovic N. Network topology availability analysis. *Telfor Journal*. 2011;3(1):23-7.
19. Zhu H. Reliability and availability analysis for large networking system. *2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 2012;1-6.
20. Monakhov Y.M., Vlasova A.M. Metodika opredeleniya dostupnosti komponentov odnorangovoy seti so slozhnoy sluchaynoy topologiyey [Methodology for determining the availability of peer-to-peer network components with complex random topology]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti [Proceedings of higher educational institutions. Textile industry technology]*. 2015(4):150-153 (in Russian).
21. Monakhov Y. M., Monakhov M. Y., Lantsov V. N. An algorithm for assessing the availability criteria in telecommunication networks. *International Journal of Computing*. 2018;17(4):219-225.
22. Monakhov Y. M., Vlasova A. M. Metodika rascheta normirovannogo kriteriya dostupnosti telekommunikatsionnoy seti [The method of calculating the normalized criterion of availability for the telecommunications network]. *Dinamika slozhnykh sistem-XXI vek [Dynamics of complex systems]*. 2015;9(3):73-77 (in Russian).
23. Monakhov Y., Kuznetsova A., Mamaev D. An Approach for Managing Availability in Software Defined Network Infrastructure. *2020 IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*. 2020;1-6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Матвеева (Кузнецова) Анна Павловна, соискатель ученой степени кандидата технических наук, старший преподаватель кафедры информатики и защиты информации, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация.

e-mail: anna.kuznetsova@ieee.org

Anna P. Matveeva (Kuznetsova), Doctoral Student. Senior Lecturer at the Department of Informatics and Information Security. Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation.