

©Корячко В. П., Перепелкин Д. А., Иванчикова М. А., Бышов В. С., 2019

DOI: 10.18255/1818-1015-2019-1-63-74

УДК 004.72

Визуальная веб-ориентированная среда динамического управления потоками данных в кампусных программно-конфигурируемых сетях

Корячко В. П., Перепелкин Д. А., Иванчикова М. А., Бышов В. С.

Поступила в редакцию 10 января 2019

После доработки 14 февраля 2019

Принята к публикации 18 февраля 2019

Аннотация. В настоящее время в области компьютерных сетей (КС) широкую популярность получают инновационные подходы, основанные на технологии программно-конфигурируемых сетей (ПКС). ПКС позволяют обеспечить гибкий подход в обработке и управлении потоков данных в КС за счет разделения плоскости управления и передачи данных, а также централизации представления всей сети. В данной работе предложен прототип программной инфраструктуры и визуальной веб-ориентированной среды (ПИВС) динамического управления потоками данных в ПКС на основе протокола OpenFlow. Предложено использовать ПИВС в качестве интегрированного сегмента кампусной сети Рязанского государственного радиотехнического университета. Целью работы является разработка архитектуры ПИВС в виде описания UML диаграмм классов, а также создание программных методов для организации эффективного сетевого взаимодействия различных программных систем в ПКС на основе протокола OpenFlow. Для подтверждения эффективности и надежности предложенной ПИВС разработан программно-аппаратный стенд на базе оборудования HP Aruba 2920-24G. Предлагаемая в работе ПИВС является основой для разработки большого класса программных систем и компонентов ПКС на основе протокола OpenFlow.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, программная инфраструктура, визуальная веб-ориентированная среда, OpenDayLight, ПИВС, SDN Topology, сетевое взаимодействие, программный компонент

Для цитирования: Корячко В. П., Перепелкин Д. А., Иванчикова М. А., Бышов В. С., "Визуальная веб-ориентированная среда динамического управления потоками данных в кампусных программно-конфигурируемых сетях", *Моделирование и анализ информационных систем*, **26:1** (2019), 63–74.

Об авторах:

Корячко Вячеслав Петрович, orcid.org/0000-0003-0272-673X, д-р техн. наук, профессор,
Рязанский государственный радиотехнический университет
ул. Гагарина, 59/1, г. Рязань, 390005 Россия, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

Перепелкин Дмитрий Александрович, orcid.org/0000-0003-4775-5745, д-р техн. наук, профессор,
Рязанский государственный радиотехнический университет, e-mail: dmitryperpelkin@mail.ru

Иванчикова Мария Александровна, orcid.org/0000-0002-9615-2898, аспирант,
Рязанский государственный радиотехнический университет, e-mail: ivanchikova.masha@yandex.ru

Бышов Владимир Сергеевич, orcid.org/0000-0001-7673-9803, аспирант,
Рязанский государственный радиотехнический университет, e-mail: b.v.s.12@yandex.ru

Благодарности:

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-1826.2019.9.

Введение

В настоящее время идеи и подходы технологии программно-конфигурируемых сетей (ПКС) возродили интерес научного сообщества к программируемым сетям, предлагая сделать процессы проектирования и контроля компьютерными сетями (КС) более инновационными и упрощенными по сравнению с современным общепризнанным подходом. Высокий уровень сложности проектирования и управления современными КС делает данную задачу труднорешаемой. Тесные связи между управляющим уровнем сети (где принимаются решения об обработке трафика) и передающим уровнем сети (где происходит фактическая пересылка трафика) серьезно усложняют процесс управления и совершенствования сети. Введение в сеть новых функциональных возможностей, например инструментов для балансировки нагрузки, требует вмешательства в инфраструктуру сети, что напрямую влияет на ее логику и требует длительной отладки и стандартизации.

Технология ПКС представляет новую парадигму КС, которая позволяет проектировать и управлять сетями с помощью введения абстракций и разделения уровней управления и передачи данных [1] – [4]. Технология ПКС также обеспечивает гибкость в управлении трафиком без использования отдельного специализированного оборудования. В ПКС вся интеллектуальная часть реализуется на центральном сервере или контроллере, что упрощает выполнение сложных операций. Идея заключается в использовании для управления такими сетями стандартных серверов или контроллеров, работающих отдельно от сетевых устройств, благодаря чему сетевые администраторы могут получать более детализированный контроль над трафиком. В настоящее время известно большое количество работ по созданию программной инфраструктуры распределенной обработки данных в ПКС на основе протокола OpenFlow [5] – [7]. Практической реализации концепции ПКС также уделяется большое внимание [8] – [12].

Целью данной работы является разработка и создание новой платформы для распределенной обработки и динамического управления потоками данных в ПКС. В составе ПИВС (программная инфраструктура и визуальная веб-ориентированная среда) предложено использовать ПКС на базе оборудования HP Aruba 2920-24G. Для централизованного управления состоянием всей сети предложено использовать OpenDayLight контроллер [13], установленный на специализированном сетевом вычислительном комплексе. Для тестирования и настройки сетевой конфигурации в OpenDayLight контроллере предлагается использовать встроенный модуль виртуальной среды MiniNet [14]. В основу разработанной ПИВС положены идеи, предложенные в работах [15, 16]. Для решения задачи динамической обработки и управления потоками данных предложено использовать различные программные компоненты адаптивной маршрутизации [17] – [20], многопутевой маршрутизации [21] – [23], балансировки потоков данных [24] – [28] и сегментации структур ПКС [29] – [34]. Архитектура ПИВС представлена в виде описания UML диаграмм классов и соответствующих программных методов.

Предложенная в работе ПИВС является основой для разработки большого класса программных систем и компонентов для ПКС.

Разработка программной инфраструктуры и визуальной веб-ориентированной среды

Программная инфраструктура и визуальная веб-ориентированная среда динамического управления потоками данных представлена на рис. 1. ПКС построена на базе оборудования HP Aruba 2920-24G с поддержкой протокола OpenFlow версии 1.3 и ниже. HP Aruba 2920-24G – управляемые гибридные коммутаторы 3-го уровня (Layer 3), предназначенные для развертывания на периферийных участках корпоративных сетей. Поддерживают модульное стекирование, интерфейс 10GbE, маршрутизацию по протоколу RIP, PoE+, списки контроля доступа (ACL), sFlow и IPv6. Коммутаторы обеспечивают стабильную работу проводных и беспроводных сетей с помощью различных унифицированных средств управления. Коммутаторы построены на базе новейшей архитектуры ProVision ASIC, которая гарантирует малое время задержки, повышенную буферизацию пакетов и адаптивное энергопотребление.

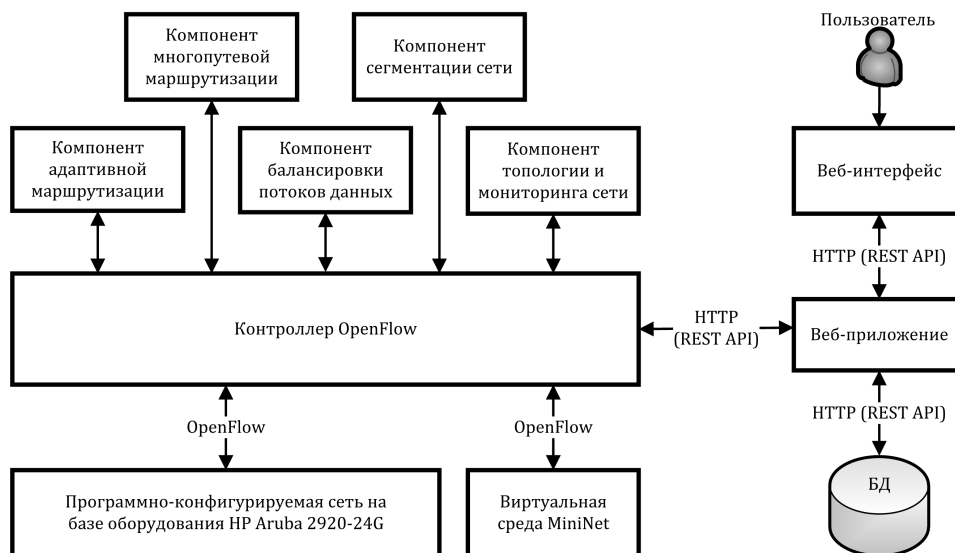


Рис. 1. Программная инфраструктура и визуальная среда SDN Topology
Fig. 1. Software infrastructure and visual web-oriented environment SDN Topology

Данная архитектура позволяет поддерживать важные для бизнеса мультимедийные приложения с высокими требованиями к пропускной способности. Возможность выбора различных конфигураций и уровня буферизации памяти, соответствующего требованиям к сетевым приложениям, повышает производительность всей сети. Управление коммутатором HP Aruba 2920-24G осуществляется с помощью веб-интерфейса и/или консольной строки через последовательный порт коммутатора. В качестве контроллера OpenFlow используется OpenDayLight контроллер, который установлен на сервере. Сервер представляет собой специализированный сетевой вычислительный комплекс на базе процессора Intel Xeon E5-2630 v4 LGA 2.2 ГГц, объем оперативной памяти 16 Гбайт DDR4 2133 МГц, объем жесткого диска 2 Тбайта. На материнской плате сервера имеются дополнительные слоты расширения объемов оперативной памяти и жесткого диска. Взаимодействие между сервере-

ром и коммутаторами HP Aruba 2920-24G осуществляется по протоколу OpenFlow. Для корректной работы протокола OpenFlow сетевому администратору необходимо обеспечить разделение плоскости управления от плоскости передачи данных с целью предотвращения сбоев в работе ПКС. Для этого созданы два VLANa: VLAN 1 и VLAN 2. VLAN 1 – это сеть или плоскость передачи данных, к которой применяются правила OpenFlow и происходит передача пакетов по этим правилам. С помощью VLAN 2 (плоскость управления) происходит обмен управляющими элементами между контроллером OpenFlow и коммутаторами OpenFlow. Контроллер сообщает конфигурационные данные и правила обработки потоков данных коммутаторам OpenFlow. Структурная схема ПКС приведена на рис. 2.

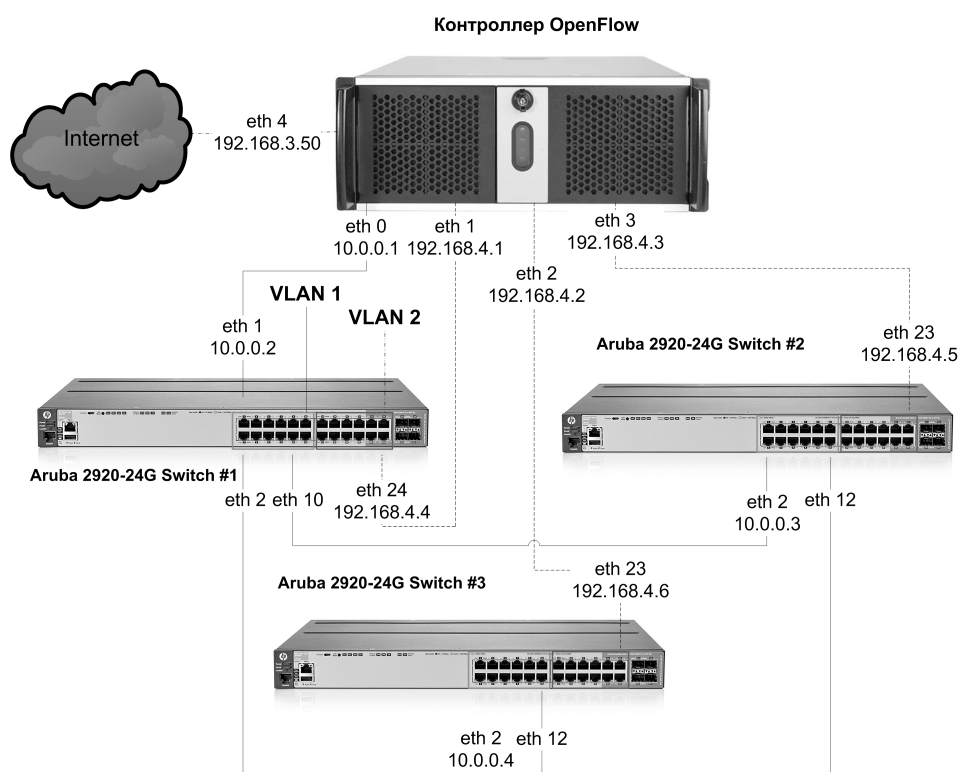


Рис. 2. Структурная схема кампусной ПКС
 Fig. 2. Structure scheme of campus SDN

ПИВС состоит из двух основных частей.

1. Первая часть – это OpenDaylight OpenFlow контроллер. OpenDaylight (ODL) – это модульная платформа Open SDN для сетей любого размера и масштаба. ODL предоставляет сетевые услуги для всего спектра оборудования в мульти-вендорной среде. Микросервисная архитектура позволяет пользователям контролировать приложения, протоколы и плагины, обеспечивая взаимодействие между внешними потребителями и поставщиками. ODL – это общая платформа, которую можно настроить любым способом для решения проблем сети. ODL сочетает в себе открытый исходный код, открытые стандарты и открытый API.

Преимуществами этой платформы являются:

- Микросервисная архитектура. Модель следующего поколения (YANG) используется для описания состояния сети и функций, которые будут выполняться в ней. ODL позволяет объединять отдельные сервисы для решения более сложных задач, используя единую структуру данных модели YANG в инфраструктуре общего хранилища и обмена сообщениями.
- Поддержка нескольких протоколов сетевого взаимодействия. Платформа похожа на традиционные протоколы, включая NETCONF, BGP / PCER и CAPWAP, а также протокол OpenFlow и другие расширения.

Для ODL контроллера были разработаны следующие программные компоненты:

- а. Компонент адаптивной маршрутизации отвечает за разработку оптимальных схем маршрутов в ПКС.
- б. Компонент многопутевой маршрутизации отвечает за многопутевую маршрутизацию в ПКС.
- в. Компонент балансировки нагрузки отвечает за балансировку потоков данных между конечными узлами.
- г. Компонент сегментации сети отвечает за построение сегментов сети. Формирование сегментов позволяет снизить вычислительную сложность расчета маршрутов и распараллелить этот процесс.
- е. Компонент топологии и мониторинга сети. Этот модуль отвечает за обновление информации о структуре сети и параметрах линий связи.

Вышеперечисленные компоненты в своей работе используют ODL контроллер. Благодаря возможностям ODL контроллера, программные компоненты взаимодействуют в сети как с реальным оборудованием HP Aruba 2920-24G, так и с виртуальной средой MiniNet.

2. Вторая часть системы представляет собой компонент управления в форме веб-приложения с графическим интерфейсом, через который контролируются другие компоненты системы. Вы можете настроить компоненты, используя RESTful API. Графический интерфейс системы доступен в браузере пользователя. Основными задачами компонента управления являются: отображение топологии сети и статистических данных, а также настройка компонентов системы, реализованных в виде модуля для ODL контроллера. Статистика записывается в базу данных, из которой статистическая информация считывается управляющим компонентом и отображается в графическом интерфейсе. Системные требования для работы компонента управления:

- Протокол связи: HTTP (REST API);
- Требуемая пропускная способность сервера для веб-приложения: 15 Мбит/с;
- Поддерживаемые операционные системы: Ubuntu версия 14.04 или 16.04;
- Оперативная память: не менее 2 Гбайт;

- Жесткий диск: не менее 300 Мбайт;
- Процессор: не менее 2 ядер и не менее 2 ГГц.

Основные сущности ПИВС предоставляются следующими классами: Topology, Switch, Link and Metrics (рис. 3).

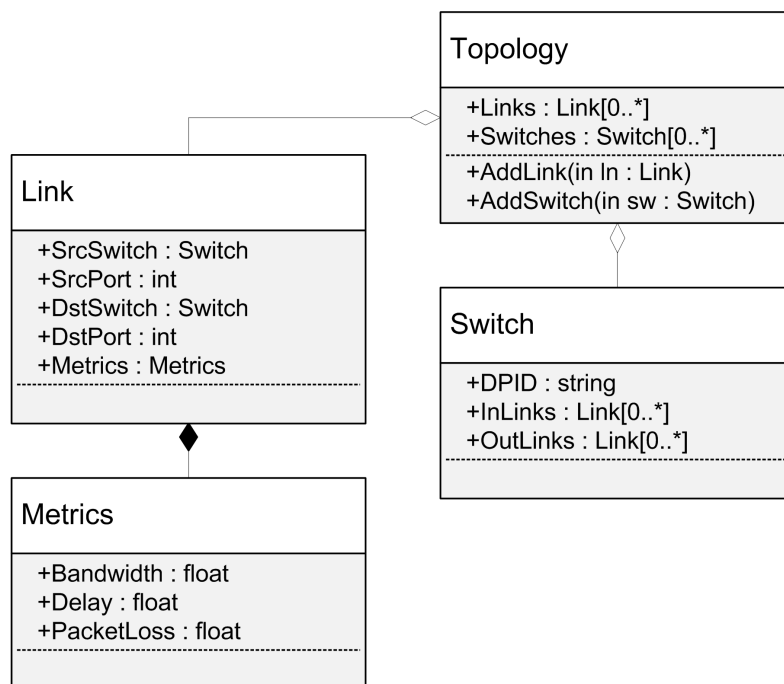


Рис. 3. Диаграмма основных классов ядра ПИВС SDN Topology
 Fig. 3. Diagram of the SIVE SDN Topology main classes

Структура Topology представляет топологию сети: множество каналов связи Links – срез структур типа Link, и множество коммутаторов Switches – срез структур типа Switch. Структура содержит два метода. Метод AddLink(ln Link) добавляет в топологию канал связи. Метод AddSwitch(sw Switch) добавляет коммутатор к топологии. Топология формируется на основе данных, полученных контроллером ПКС.

Структура Switch представляет коммутатор OpenFlow, который имеет уникальный идентификационный номер – DPID, заданный строковым типом. Каждый коммутатор содержит два множества каналов связи. InLinks – срез структур типа Link. Данные каналы связи представляют ребра, направленные в данный коммутатор. OutLinks – срез структур типа Link. Данные каналы связи представляют ребра, направленные из данного коммутатора.

Структура Link представляет канал связи. Структура ссылается на коммутатор SrcSwitch – структура типа Switch, из которого направлено ребро, представляемое данным каналом связи. Коммутатор DstSwitch – структура типа Switch, в него направлено ребро, представляемое данным каналом связи. Для канала связи заданы номера портов, к которым присоединен данный канал: SrcPort – номер порта SrcSwitch, к которому подключен данный канал связи, DstPort – номер порта DstSwitch, к которому подключен данный канал связи. Метрики канала связи представлены структурой типа Metrics.

Структура Metrics содержит информацию о метриках канала связи: пропускная способность, задержка, процент потерь пакетов. Структура состоит из следующих компонентов: Bandwidth – текущая пропускная способность канала связи, Delay – текущая задержка канала связи. PacketLoss – текущий процент потерь пакетов канала связи.

Основные классы для организации сетевого взаимодействия ПИВС и контроллера OpenDayLight приведены на рис. 4.

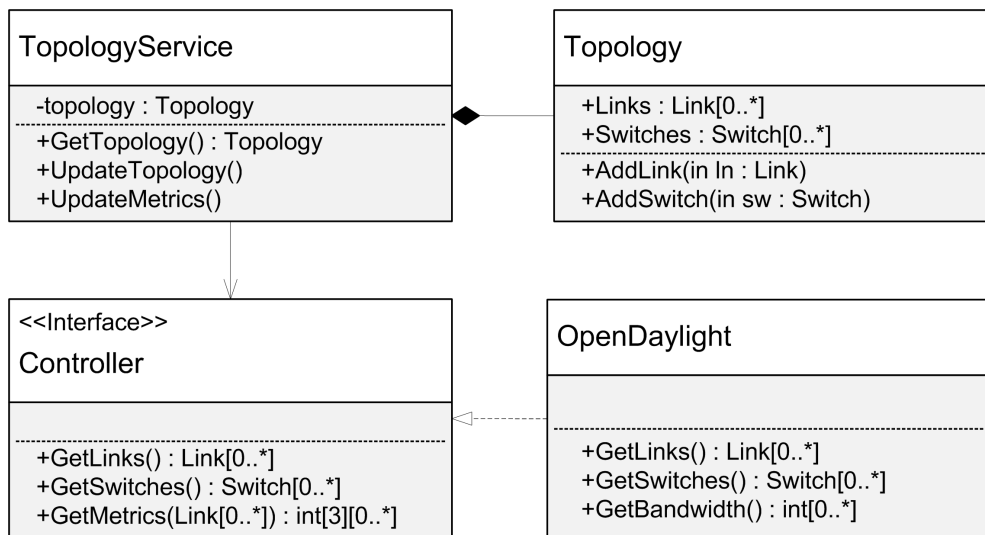


Рис. 4. Диаграмма основных классов для организации сетевого взаимодействия ПИВС и контроллера OpenDayLight

Fig. 4. The main classes for organization of network interaction of SDN Topology and ODL controller

Структура TopologyService обновляет сетевую топологию, хранящуюся в topology – структуре типа Topology. Метод GetTopology() Topology – возвращает сетевую топологию. Метод UpdateTopology() – обновляет структуру сетевой топологии (каналы связи и коммутаторы). Метод UpdateMetrics() – обновляет метрики каналов связи (пропускную способность, процент потерь пакетов, задержку передачи). Интерфейс Controller задает поведение абстрактного контроллера ПКС. Конкретная реализация интерфейса должна реализовать следующие методы: GetLinks() Link[0..*] – возвращает срез каналов связи сети, GetSwitches() Switch[0..*] – возвращает срез коммутаторов сети и GetMetrics(Link[0..*]) int[3][0..*] – возвращает метрики каналов связи. Структура OpenDaylight реализует интерфейс Controller с помощью REST API контроллера OpenDaylight.

Графический интерфейс ПИВС (рис. 5) условно можно разделить на следующие части:

- Программное меню (Menu);
- Инструменты управления (Instruments);
- Графический интерфейс (Graphic Interface).

Графический редактор отображает элементы проектируемой топологии. Компьютерная модель ПКС, используемая в SDN Topology, состоит из следующих элементов:

- коммутаторы OpenFlow;
- хосты;
- интерфейсы между хостами и коммутаторами.

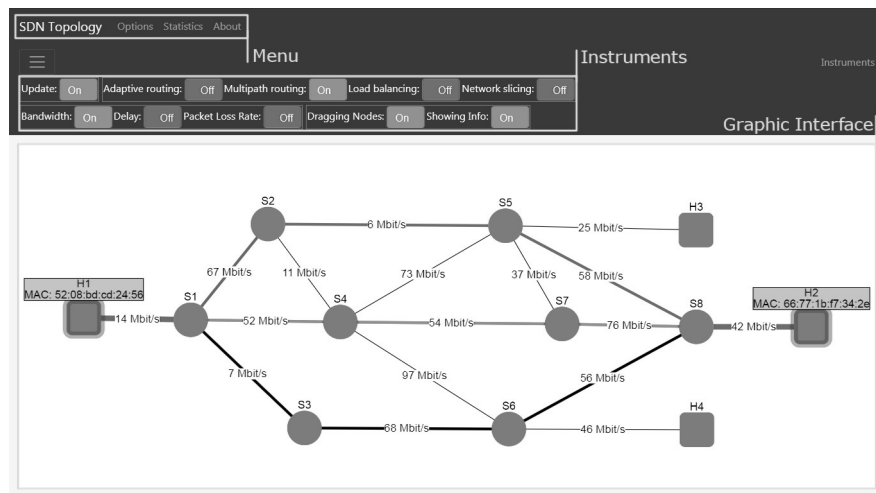


Рис. 5. Интерфейс ПИВС SDN Topology
 Fig. 5. SIVE SDN Topology interface

ПИВС SDN Topology обеспечивает динамическое управление потоками данных в ПКС. Выполнение компонента адаптивной маршрутизации показано на рис. 6.

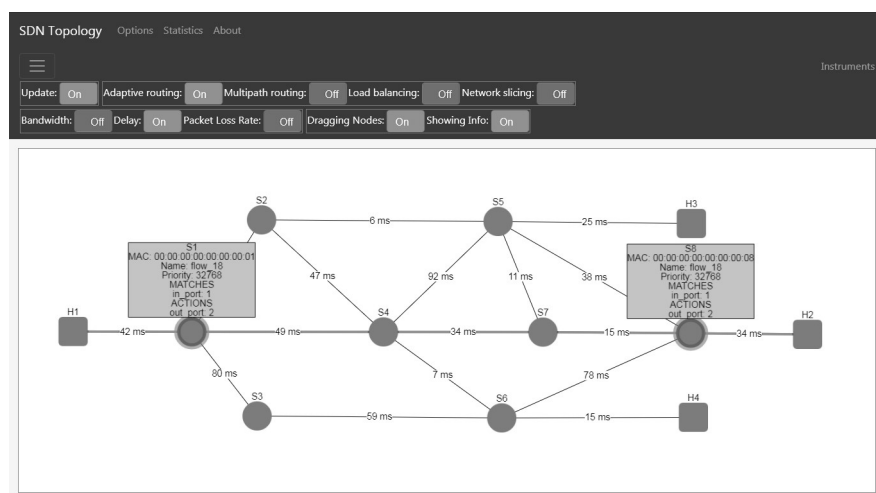


Рис. 6. Выполнение компонента адаптивной маршрутизации
 Fig. 6. The execution of adaptive routing component

Заключение

В работе представлена программная инфраструктура и визуальная среда распределенной обработки и динамического управления потоками данных в программно-конфигурируемых сетях на основе протокола OpenFlow. Разработанную ПИВС предлагается использовать в качестве интегрированного сегмента кампусной сети Рязанского государственного радиотехнического университета.

Программно-конфигурируемая сетевая инфраструктура построена на базе оборудования HP Aruba 2920-24G. Архитектура разработанной ПИВС представлена в виде описания UML диаграмм классов и соответствующих программных фрагментов их реализации.

Разработанная ПИВС является основой для реализации большого класса программных систем и компонентов обработки данных в ПКС. Результаты экспериментального исследования различных программных компонентов динамической обработки потоков данных на основе разработанной ПИВС будут детально рассмотрены в последующих работах.

Список литературы / References

- [1] McKeown N. et al., “Openflow: enabling innovation in campus networks”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, **38:2** (2008), 69–74.
- [2] Kobayashi M. et al., “Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments”, *Computer Networks*, **61** (2014), 151–175.
- [3] Egilmez H.E., *Adaptive Video Streaming over OpenFlow Networks with Quality of Service*, Thesis for Degree of Master Science in Electrical and Electronics Engineering, Koc University, 2012.
- [4] Ongaro F., *Enhancing quality of service in software-defined networks*, Thesis for Degree of Master Science in Computer Engineering, University of Bologna, 2014.
- [5] *GENI: Exploring Network of the Future*, <http://www.geni.net>.
- [6] Choumas K. et al., “Testbed Innovations for Experimenting with Wired and Wireless Software Defined Networks”, *IEEE 35th International Conference*, 2015, 87–94.
- [7] Antonenko V. et al., “Towards SDN-bases Infrastructure for supporting science in Russia”, *Proceedings SDN and NFV: Next Generation of Computational Infrastructure – 2014 (International Science and Technology Conference MoNeTec 2014)*, 2014, 1–7.
- [8] Егоров В.Б., “Некоторые вопросы практической реализации концепции SDN”, *Системы и средства информатики*, **26:1** (2016), 109–120; [Egorov V.B., “Some issues of the SDN concept practical implementation”, *Systems and Means of Informatics*, **26:1** (2016), 109–120, (in Russian).]
- [9] Гузев О.Ю., Чижов И.В., “Балансировка нагрузки в защищенных сетях с использованием технологии SDN”, *Системы и средства информатики*, **28:1** (2018), 123–138; [Guzev O.Yu., Chizhov I.V., “SDN load balancing for secure networks”, *Systems and Means of Informatics*, **28:1** (2018), 123–138, (in Russian).]
- [10] Гузев О.Ю., Чижов И.В., “SDN-балансировка на криптографические маршрутизаторы при объединении центров обработки данных”, *Системы и средства информатики*, **28:1** (2018), 139–155; [Guzev O.Yu., Chizhov I.V., “SDN load balancing on L3-VPN gateways in data centers interconnection”, *Systems and Means of Informatics*, **28:1** (2018), 139–155, (in Russian).]
- [11] Малахов С.В., Тарасов В.Н., Карташевский И.В., “Теоретическое и экспериментальное исследование задержки в программно-конфигурируемых сетях”, *Инфокоммуникационные технологии*, **13:4** (2015), 409–413; [Malakhov S.V., Tarasov V.N.,

- Kartashevsky I.V., “Theoretical and experimental research of packet delays in software defined networks”, *Infokommunikacionnye tehnologii*, **13:4** (2015), 409–413, (in Russian).]
- [12] Бахарева Н.Ф. и др., “Управление корпоративными программно-конфигурируемыми сетями”, *Вестник Оренбургского государственного университета*, 2015, № 13(188), 108–113; [Bakhareva N.F., et al., “Management of enterprise software defined networks”, *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, № 13(188), 108–113, (in Russian).]
- [13] *OpenDayLight Controller*, <https://www.opendaylight.org/>.
- [14] *Virtual Network MiniNet*, <http://mininet.org>.
- [15] Perepelkin D., Byshov V., “Visual design environment of dynamic load balancing in software defined networks”, *2017 27th International Conference Radioelektronika*, IEEE, 2017, 183–186.
- [16] Perepelkin D., et al., “Development of architecture of visual program system for distributed data processing in software defined networks”, *2018 28th International Conference Radioelektronika*, IEEE, 2018, 281–284.
- [17] Корячко В.П., Перепелкин Д.А., *Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях*, Горячая линия – Телеком, Москва, 2012; [Koryachko V.P., Perepelkin D.A., *Analiz i proektirovanie marshrutov peredachi dannyh v korporativnyh setyah*, Gorjachaja liniya – Telekom, Moscow, 2012, (in Russian).]
- [18] Перепелкин Д.А., Перепелкин А.И., “Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации в условиях динамически изменяющихся нагрузок на линиях связи в корпоративной сети”, *Информационные технологии*, 2011, № 3, 2–7; [Perepelkin D.A., Perepelkin A.I., “The Accelerated Algorithm Adaptive Routing in Dynamically Changing Loads on the Lines of Communication in Corporate Network”, *Information Technologies*, 2011, № 3, 2–7, (in Russian).]
- [19] Перепелкин Д.А., “Динамическое формирование структуры и параметров линий связи корпоративной сети на основе данных о парных перестановках маршрутов”, *Информационные технологии*, 2014, № 4, 52–60; [Perepelkin D.A., “Dynamic Corporate Network Structure and Communication Links Loading Formation Based on Routes Pairs Permutations Data”, *Information Technologies*, 2014, № 4, 52–60, (in Russian).]
- [20] Перепелкин Д.А., “Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки”, *Информационные технологии*, **21:8** (2015), 602–610; [Perepelkin D.A., “Conceptual Approach of Dynamic Traffic Formation of Software-Defined Telecommunication Networks with Load Balancing”, *Information Technologies*, **21:8** (2015), 602–610, (in Russian).]
- [21] Корячко В. П., Перепелкин Д. А., “Разработка и исследование математической модели многопутевой адаптивной маршрутизации в сетях связи с балансировкой нагрузки”, *Электросвязь*, 2014, № 12, 27–31; [Koryachko V.P., Perepelkin D.A., “Development and research of the mathematical model multipath adaptive routing in telecommunication networks with load balancing”, *Electrosvyaz*, 2014, № 12, 27–31, (in Russian).]
- [22] Перепелкин Д.А., “Математическая модель многопутевой адаптивной маршрутизации с балансировкой неоднородной нагрузки в условиях динамических подключений узлов и линий связи в телекоммуникационных сетях”, *Радиотехника*, 2015, № 5, 46–54; [Perepelkin D.A., “Mathematical model of multipath adaptive routing with heterogeneous load balancing in the course of nodes and communication links dynamic connections in telecommunication networks”, *Radioengineering*, 2015, № 5, 46–54, (in Russian).]
- [23] Перепелкин Д.А., “Модель отказоустойчивой многопутевой адаптивной маршрутизации с балансировкой неоднородной нагрузки в сетях связи”, *Радиотехника*, 2015, № 11, 40–47; [Perepelkin D.A., “Model of fault-tolerant multipath adaptive routing with load balancing of heterogeneous traffic in communication networks”, *Radioengineering*, 2015, № 11, 40–47, (in Russian).]
- [24] Koryachko V.P., Perepelkin D.A., Byshov V.S., “Improved multipath adaptive routing model in computer networks with load balancing”, *Proceedings IEEE 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016, 1–4.

- [25] Koryachko V.P., Perepelkin D.A., Byshov V.S., “Multipath adaptive routing in computer networks with load balancing”, *2016 Mediterranean Conference on Embedded Computing*, IEEE, 2016, 281–285.
- [26] Koryachko V.P., Perepelkin D.A., Byshov V.S., “Development and research of improved model of multipath adaptive routing in computer networks with load balancing”, *Automatic Control and Computer Sciences*, **51**:1 (2017), 63–73.
- [27] Перепелкин Д.А., Бышов В.С., “Балансировка потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества обслуживания сетевых сервисов”, *Радиотехника*, 2016, № 11, 111–119; [Perepelkin D.A., Byshov V.S., “Load balancing in software defined networks with quality of services”, *Radioengineering*, 2016, № 11, 111–119, (in Russian).]
- [28] Koryachko V. P., Perepelkin D. A., Byshov V. S., “Enhanced dynamic load balancing algorithm in computer networks with quality of services”, *Automatic Control and Computer Sciences*, **52**:4 (2018), 268–282.
- [29] Перепелкин Д.А., “Динамическое формирование трафика корпоративных сетей на основе метода маршрутизации по подсетям”, *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, 2015, № 51, 35–41; [Perepelkin D.A., “Dynamic traffic formation of corporate networks based on routing method of subnets”, *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2015, № 51, 35–41, (in Russian).]
- [30] Перепелкин Д.А., Цыганов И.Ю., “Усовершенствованный алгоритм сегментации структур корпоративных сетей по критерию минимальной стоимости”, *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, 2015, № 53, 48–57; [Perepelkin D.A., Tsyganov I.Yu., “Improved algorithm of structures segmentation with minimum cost criterion in corporate networks”, *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2015, № 53, 48–57, (in Russian).]
- [31] Perepelkin D.A., Tsyganov I.Yu., “Proactive backup scheme of routes in distributed computer networks”, *Proceedings IEEE 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2016, 1–4.
- [32] Perepelkin D.A., Tsyganov I.Yu., “Paired transitions algorithm of communication links in computer networks based on subnet routing method”, *5th Mediterranean Conference on Embedded Computing*, IEEE, 2016, 260–263.
- [33] Perepelkin D., Ivanchikova M., Ivutin A., “Fast rerouting algorithm in distributed computer networks based in subnet routing method”, *2017 27th International Conference Radioelektronika*, IEEE, 2017, 187–190.
- [34] Perepelkin D. et al., “Algorithm and software of virtual slices formation in software defined networks”, *2018 28th International Conference Radioelektronika*, IEEE, 2018, 265–268.

Koryachko V. P., Perepelkin D. A., Ivanchikova M. A., Byshov V. S., "Visual Web-Oriented Environment of Dynamic Control of Data Flow in Campus of Software Defined Networks", *Modeling and Analysis of Information Systems*, **26**:1 (2019), 63–74.

DOI: 10.18255/1818-1015-2019-1-63-74

Abstract. Nowadays new innovative approaches based on the technology of software defined networks (SDN) are gaining popularity in the field of computer networks (CN). SDN provide a flexible approach to the processing and control of data flows in CN by separating the control plane and data plane, as well as centralizing the representation of the entire network. In this paper, we propose a software infrastructure and a visual web-oriented environment (SIVE) for dynamic control of data flows in campus SDN based on OpenFlow protocol. It was proposed to use the SIVE as an integrated segment of the campus network of Ryazan State Radio Engineering University. The aim of the work is the development of the SIVE architecture in the form of UML class diagram description, as well as the creation of software methods for organizing effective network interaction of various software systems in SDN based on OpenFlow protocol. A hardware-software test bench based on HP Aruba 2920-24G equipment was developed to confirm the efficiency and reliability of the proposed SIVE. The offered

SIVE is the basis for the development of a large class of software systems and SDN components based on OpenFlow protocol.

Keywords: software defined networks, software infrastructure, visual web-oriented environment, OpenDayLight, SIVE, SDN Topology, network interaction, program component

On the authors:

Vyacheslav P. Koryachko, orcid.org/0000-0003-0272-673X, PhD,
Ryazan State Radioengineering University,
59/1 Gagarina str., Ryazan 390005, Russia, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

Dmitry A. Perepelkin, orcid.org/0000-0003-4775-5745, PhD,
Ryazan State Radioengineering University,
59/1 Gagarina str., Ryazan 390005, Russia, e-mail: dmitryperepelkin@mail.ru

Maria A. Ivanchikova, orcid.org/0000-0002-9615-2898, postgraduate student,
Ryazan State Radioengineering University,
59/1 Gagarina str., Ryazan 390005, Russia, e-mail: ivanchikova.masha@yandex.ru

Vladimir S. Byshov, orcid.org/0000-0001-7673-9803, postgraduate student,
Ryazan State Radioengineering University,
59/1 Gagarina str., Ryazan 390005, Russia, e-mail: b.v.s.12@yandex.ru

Acknowledgments:

The work was supported by the Grant of the President of the Russian Federation (МД-1826.2019.9).