

# ОБЗОР МЕТОДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕЙ

**А. И. Выборнова**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Адрес для переписки: a.vybornova@gmail.com

**Аннотация**—В статье приводится анализ существующих в настоящее время методов решения задачи размещения контроллеров в мультиконтроллерной программно-конфигурируемой сети с использованием технологий роевого интеллекта. Для этого формулируется задача размещения контроллеров, а также возможные критерии и ограничения оптимизации. **Предметом исследования** является задача оптимального размещения контроллеров и методы ее решения. В качестве **метода исследования** выступает анализ литературы, а также многокритериальное сравнение найденных методов решения поставленной задачи. **Основным результатом** работы является сравнительный анализ применения различных методик роевой оптимизации для решения поставленной задачи, с учетом различных критериев и условий оптимизации. **Практическая значимость** работы состоит в возможности применения полученных результатов при планировании и оптимизации программно-конфигурируемых сетей с несколькими контроллерами.

**Ключевые слова**—роевой интеллект, программно-конфигурируемые сети, метод роя частиц.

## Информация о статье

УДК 004.722

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 30.11.2020, принята к печати 23.12.2020.

**Ссылка для цитирования:** Выборнова А. И. Обзор методов использования алгоритмов роевого интеллекта для построения и оптимизации программно-конфигурируемых сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 4. С. 83–92. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-4-83-92.

# A SURVAY ON THE SWARM INTELLIGENCE APPROACHES TO CONTROLLER PLACEMENT PROBLEM IN THE SOFTWARE DEFINED NETWORKS DESIGN AND OPTIMIZATION

**A. Vybornova**

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Corresponding author: a.vybornova@gmail.com

**Abstract**—This article is dedicated to the overview and analysis of the existing approaches to the controller placement problem for the multi-controller Software Defined Networks (SDN) with a focus on the swarm intelligence methods. For this purpose, the controller placement problem is defined, as well as possible optimization functions and constraints. **Research subject** of this article is a controller placement problem for the multi-controller SDN. As a **research method** a comparative analysis is used. **Core results** of the work is a comparison of different approaches based on the different optimality criteria and constraints. **Practical relevance** of the work is that the results can be used in the SDN design and optimization.

**Keywords**—swarm intelligence, software defined networks, particle swarm optimization.

## Article Info

Article in Russian.

Received 30.11.2020, accepted 23.12.2020.

**For citation:** Vybornova A.: A Survay on the Swarm Intelligence Approaches to Controller Placement Problem in the Software Defined Networks Design and Optimization // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 4. pp. 83–92 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-4-83-92.

## Введение

За более чем десять лет существования концепция программно-конфигурируемых сетей (ПКС) показала свои преимущества и возможность использования для создания масштабных, производительных и надежных сетей связи. ПКС, построенные на открытых протоколах и технологиях, с разделением функций коммутации и управления сетью, позволяют создавать более гибкую и масштабируемую сетевую инфраструктуру, которая будет востребована для перспективных сетевых приложений, таких как дополненная реальность, летающие сети и Тактильный интернет [1, 2, 3].

В то же время вокруг технологий ПКС все еще существует некоторое количество открытых вопросов и неисследованных проблем. Одним из распространенных сомнений относительно массового внедрения ПКС является возможное уменьшение надежности функционирования, так как концепция ПКС предполагает разделение функций коммутации и управления, при этом подразумевается централизация функций управления сетью в одном контроллере (рис. 1а). Безусловно, эта проблема может быть частично решена при помощи резервирования контроллера, однако в последние годы все большую популярность приобретает

другой подход – мультиконтроллерная ПКС [4, 5]. Помимо вопроса надежности, мультиконтроллерный подход решает также и проблему масштабируемости сети, так как при обслуживании сетью большой нагрузки может быть эффективнее (с точки зрения стоимости развертывания и функционирования сети, а также с точки зрения задержки передачи данных через сеть) использовать распределенную сеть контроллеров вместо одного, сопоставимого по мощности.

В то же время некоторые работы [6] приводят данные о том, что подход, в котором логически единственный контроллер ПКС работает на нескольких физических серверах (*Logically Centralized-Physically Distributed, LC-PD*), может позволить уменьшить задержку и увеличить пропускную способность по сравнению с другими архитектурными подходами.

Программно-конфигурируемая сеть с несколькими контроллерами (или по-другому, с распределенным уровнем управления) представляет собой сетевую структуру, в которой на уровне управления сетью присутствует несколько контроллеров, каждый из которых управляет несколькими коммутаторами (рис. 1б).

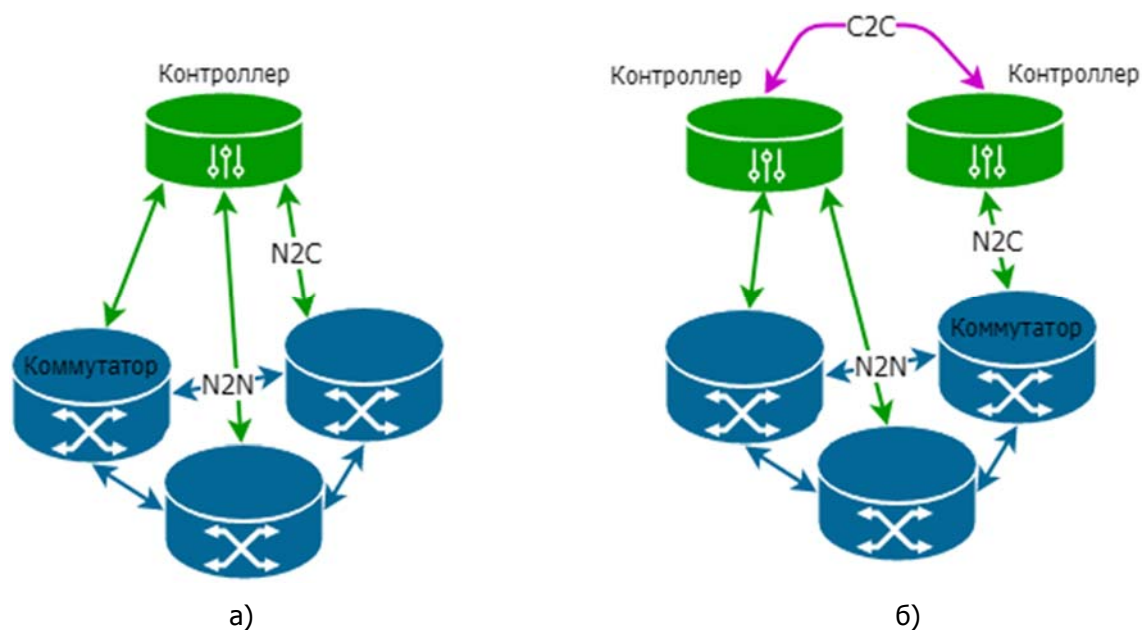


Рис. 1. Варианты архитектуры ПКС

При этом основной задачей становится выбор расположения контроллеров и распределение коммутаторов между контроллерами, известная как проблема размещения контроллеров (*Controller Placement Problem*) [7, 8]. Существует ряд алгоритмов, предлагающих решение этой проблемы, и направленных на минимизацию задержки передачи данных, потребления энергии, вероятности отказов, стоимости развертывания и обслуживания сети, а также оптимизацию загрузки контроллеров. Учитывая алгоритмическую сложность задачи [7], наиболее перспективным в этом отношении видится использование интеллектуальных алгоритмов, в частности, методов роя частиц.

Данная статья описывает варианты использования различных алгоритмов роя частиц для решения задач оптимизации и функционирования ПКС. В первой части приводится постановка задачи размещения контроллеров, а также описываются критерии оптимизации. Во второй части приведен сравнительный анализ имеющихся на текущий момент применений различных методов роя частиц для

решения той задачи. В третьей части сделаны выводы и обозначены перспективные направления работы.

## 1 Проблема размещения контроллеров и критерии оптимизации

Задача размещения контроллеров в ПКС может быть сформулирована следующим образом [7]. В случае, если в плоскости управления ПКС используется более одного контроллера, необходимо выяснить:

1. Какое число контроллеров будет являться оптимальным для данной сети с данной нагрузкой.

2. Каково оптимальное место расположения каждого из контроллеров.

3. Как оптимально распределить коммутаторы ПКС между контроллерами.

Проблему можно разделить на два класса – без ограничения по пропускной способности контроллеров и с ограниченной пропускной способностью контроллеров. При этом пропускная способность контроллеров может рассматриваться с точки зрения:

- числа обслуживаемых коммутаторов;
- числа одновременно обрабатываемых потоков данных;
- количества пакетов, обрабатываемых в единицу времени [8].

Также задачу размещения контроллеров можно классифицировать на задачу без отказов оборудования и задачу с отказами [7]. Ограниченную пропускную способность контроллеров и вероятность отказа элементов сети можно рассматривать как ограничительные функции в задаче оптимизации.

Критерии оптимизации для задачи размещения контроллеров можно классифицировать следующим образом:

1. Минимизация задержки передачи сигнала, которую в свою очередь можно классифицировать следующим образом:

a. Задержка от узла к контроллеру (*Node to Controller, N2C*) – средняя либо максимальная задержка передачи данных от коммутатора (узла) к обслуживаемому его контроллеру.

b. Задержка между контроллерами (*Controller to Controller, C2C*) – суммарная задержка между всеми парами контроллеров.

c. Время настройки потока данных (*Flow Setup Time*) – среднее время прохождения от источника до получателя первого пакета данных, которое отличается от времени прохождения через сеть последующих пакетов, так как в этом случае контроллеру требуется найти и зафиксировать оптимальный путь передачи пакетов, относящихся к данному потоку.

2. Максимизация надежности сети:

a. Минимизация вероятности или времени отказов отдельных элементов сети, таких как контроллеры, коммутаторы и каналы связи.

b. Минимизация времени недоступности сети в целом. Так как гибкая структура ПКС в том числе направлена на поддержание или быстрое восстановление работы сети после отказов отдельных элементов, более корректным показателем для оптимизации была бы доступность сети в целом, а не отдельных ее элементов.

c. Минимизация процента потерянных пакетов.

3. Минимизация разности в нагрузке между различными контроллерами (балансировка нагрузки), которая может вычисляться как среднеквадратическое отклонение нагрузки контроллеров.

4. Минимизация энергопотребления устройств сети.

5. Минимизация финансовых затрат:

a. капитальных затрат на развертывание сети (CAPEX);

b. операционных расходов на обслуживание сети (OPEX).

Указанная задача оптимизации является задачей недетерминированной полиномиальной сложности (NP-hard), аналогичная задаче о размещении объектов [7], в связи с этим представляется разумным использование эвристических и метаэвристических методов оптимизации, к которым относится и семейство методов роевого интеллекта.

## **2 Подходы к оптимизации мультиконтроллерной ПКС на основе метода роя частиц**

В работе [9], одной из первых, где было предложено использовать метод роя частиц (МРЧ) для решения задачи расположения контроллеров, авторы предлагают найти оптимальное расположение заранее известного числа контроллеров ПКС. Критерием оптимизации выступает задержка передачи пакетов по сети (C2C, N2C). Отказы в ПКС в работе не рассматриваются. Авторы показывают, что для ПКС относительно большого размера их подход к решению задачи размещения контроллеров дает лучшие результаты, чем существовавшие на тот момент подходы, в частности, использование линейного программирования и жадных алгоритмов.

В работе [10] аналогично предыдущей используется МРЧ для нахождения оптимального расположения контроллеров, однако предварительно сеть разбивается на несколько кластеров, каждый из которых управляется единственным контроллером. Таким образом, авторам удается одновременно с оптимальным расположением контроллеров определить также оптимальное распределение коммутаторов по контроллерам. Авторы показывают, что их подход позволяет достичь большего процента использования контроллеров по сравнению с другими подходами по кластеризации сети.

Заслуживающий внимания гибридный подход предлагается в работе [11]. Авторы дополняют традиционный генетический алгоритм мультикритериальной оптимизации (*Multi-Objective Genetic Algorithm*, MOGA) алгоритмом мутаций при помощи МРЧ, что позволяет исключить ненаправленные мутации и уменьшить время сходимости алгоритма. Таким образом, указанный алгоритм позволяет быстрее и с большей точностью найти оптимальное расположение контроллеров и распределение коммутаторов по контроллерам. Критериями оптимизации выступают задержка и равномерность нагрузки.

Работы [12, 13] посвящены использованию алгоритма светлячков (*Firefly algorithm*) для решения задачи размещения контроллеров ПКС. В обеих работах данная задача рассматривается как задача комбинаторной оптимизации. В работе [12] в качестве критерия оптимизации используются задержки N2C и C2C, авторы с помощью имитационного моделирования показывают, что использование алгоритма светлячков по сравнению с традиционным МРЧ дает более близ-

кие к оптимальным значения задержки, а на сетях большого размера еще и несколько меньшее время работы алгоритма. Работа [13] развивает этот же подход, добавляя новый критерий оптимизации – связность сети между коммутатором и контроллером, то есть наличие дополнительных путей передачи данных между контроллером и коммутатором в случае выхода из строя основного канала, при этом время передачи данных по этим путям также должно быть минимальным. Имитационное моделирование подтверждает выводы предыдущего исследования, а также показывает, что использование алгоритма светлячков для определения топологии ПКС позволяет добиться меньшего увеличения задержки N2C при выходе из строя основного канала, по сравнению с топологией, оптимизированной при помощи традиционного МРЧ.

В работе [14] предлагается отличная от предыдущих формулировка задачи оптимизации – поиск минимального числа контроллеров, необходимых для задания ПКС с заданными показателями надежности и задержки.

Вопрос надежности ПКС при выходе из строя контроллеров рассматривается в работе [15]. Задачу оптимизации числа и мест расположения резервных контроллеров авторы предлагают рассматривать как мультикритериальную задачу комбинаторной оптимизации и решают ее при помощи МРЧ и генетических алгоритмов.

В работе [16] авторы предлагают использовать алгоритм волчьей стаи (*Grey wolf algorithm*) для решения задачи размещения контроллеров ПКС для сетей пятого поколения 5G с учетом возможности динамических изменений в сети. Авторы показывают, что по сравнению с традиционным МРЧ предложенный алгоритм показывает меньшее время работы алгоритма с учетом ограничений, накладываемых требованиями к качеству обслуживания.

Авторы работы [17] предлагают подход, одновременно определяющий все три параметра задачи размещения контроллеров ПКС: число контроллеров, их расположение и распределение коммутаторов между ними. В качестве критериев оптимизации предлагается использовать число контроллеров, задержку N2C и затраты на развертывание и обслуживание сети. Решение данной комплексной задачи выполнено с использованием алгоритма хаотического роя сальп, и авторы показывают, что предложенный подход находит оптимальное решение за меньшее время, чем МРЧ, алгоритм стаи волков и алгоритм игры с ненулевой суммой.

В работе [18] предложена динамическая модификация роевого алгоритма сальп для решения задачи выбора объектов, что при применении нового алгоритма к задаче размещения контроллеров SDN может потенциально увеличить точность и скорость сходимости алгоритма, представленного в [17], а также уменьшить размерность данных.

Авторы работы [19] предлагают использование ускоренного МРЧ (Accelerate PSO) для определения числа и расположения контроллеров в спутниковой ПКС с использованием двух подходов: статического, при котором контроллеры устанавливаются в сети заранее, и их месторасположение, и состояние (включен или выключен) не меняются, и динамический, в котором предполагается большое количество установленных контроллеров, состояние которых меняется в зависимости от условий. Авторы берут в расчет большое количество критериев оптимизации и ограничений, таких как задержка передачи данных в сети, вариация задержки, трафик в каналах связи, балансировка нагрузки контроллеров, затраты на развертывание сети. Авторы показывают, что динамический подход

дает большую производительность и гибкость сети, в то время как статический подход требует меньше финансовых затрат.

Заслуживающий внимания подход к решению задачи размещения контроллеров ПКС представлен в работе [20]. Авторы предлагают использовать адаптивный алгоритм бактериального поиска (*Adaptive Bacterial Foraging Optimization*) для оптимизации расположения контроллеров, распределения коммутаторов между контроллерами и числа запросов, обслуживаемых каждым контроллером. В качестве критериев оптимизации использовалась вероятность отказа N2C канала, задержка N2C, и равномерность распределения нагрузки между контроллерами (вариация загрузки контроллеров). Предложенный алгоритм показал улучшение равномерности нагрузки на контроллеры и уменьшение задержки передачи данных по сравнению с МРЧ.

В работе [21] предложен новейший метод из класса алгоритмов оптимизации роем частиц – кастовая оптимизация (*Varna-based optimization*), в котором предложено рассматривать множество контроллеров и коммутаторов как рой частиц, каждая из которых относится к некоторому классу, и может менять его в зависимости от величины некоторой функции кармы. Авторы применяют данный подход к задаче размещения контроллеров как с учетом пропускной способности контроллеров, так и без ее учета, критерием оптимизации является задержка, и сравнивают результаты с алгоритмом самообучающейся оптимизации (*Teaching Learning-Based Optimization*) и другими алгоритмами.

Таблица.

Сравнение подходов к решению задачи размещения контроллеров на основе метода роя частиц

Ссылка	Целевые параметры	Критерии оптимизации	Алгоритм	Пропускная способность контроллеров	Отказы в сети
[9]	Расположение контроллеров	Задержки C2C, N2C	МРЧ	Учитывается	Не учитываются
[10]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Задержки N2C, C2C, равномерность нагрузки на контроллеры	Кластеризация, МРЧ	Учитывается	Не учитываются
[11]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Задержки N2C, C2C, равномерность нагрузки на контроллеры	Генетический алгоритм + МРЧ	Не учитывается	Не учитываются
[12]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Задержки N2C, C2C	Алгоритм светлячков	Не учитывается	Не учитываются
[13]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Задержки N2C, C2C, связность сети	Алгоритм светлячков	Не учитывается	Учитываются

Ссылка	Целевые параметры	Критерии оптимизации	Алгоритм	Пропускная способность контроллеров	Отказы в сети
[14]	Число контроллеров	Число контроллеров с заданной надежностью и задержками N2C, C2C	МРЧ	Не учитывается	Учитываются
[15]	Число и расположение резервных контроллеров	Число резервных контроллеров с заданными характеристиками восстановления сети после неисправностей	Генетический алгоритм + МРЧ	Не учитывается	Учитываются
[16]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Задержки передачи данных	Алгоритм волчьей стаи	Не учитывается	Учитываются
[17]	Число и расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Число контроллеров, задержка N2C, CAPEX, OPEX	Алгоритм хаотического роя сальп	Учитывается	Не учитываются
[19]	Число и расположение контроллеров	Число контроллеров, задержка, вариация задержки, равномерность нагрузки на контроллеры	Ускоренный МРЧ	Учитывается	Учитываются
[20]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов, число запросов, обслуживаемых контроллером	Задержка N2C, вероятность отказа канала N2C, равномерность нагрузки на контроллеры	Адаптивный алгоритм бактериального поиска	Не учитывается	Учитываются
[21]	Расположение контроллеров, распределение коммутаторов	Задержки C2C, N2C	Самообучающийся алгоритм оптимизации, кастовая оптимизация	Учитывается	Не учитываются

### 3 Заключение

В данной работе рассмотрено сравнение методов решения задачи размещения контроллеров ПКС при помощи алгоритмам роевого интеллекта. Рассмотренные методы позволяют найти приближенное к оптимальному число контроллеров, необходимых для обслуживания ПКС, а также места их размещения



и распределение коммутаторов по обслуживающим их контроллерам. В качестве критерия оптимизации в указанных подходах чаще всего используется задержка передачи данных по сети в целом или по отдельным ее частям, но во многих случаях к ней добавляются или заменяют ее такие параметры как равномерность нагрузки на контроллеры сети, финансовые затраты (CAPEX, OPEX), а также различные показатели надежности сети. Несмотря на эффективность данных подходов, показанную авторами работ, следует отметить, что в дальнейшем, вероятно, потребуется разработка комплексной модели применения различных методов, с учетом ограниченной пропускной способности сети, отказов оборудования и каналов связи и т. д.

### References

1. Ateya A. A. et al. Intelligent core network for Tactile Internet system // Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems. 2017. С. 1–6.
2. Makolkina, Maria & Paramonov, Alexander & Vladyko, Andrei & Dunaytsev, Roman & Kirichek, Ruslan & Koucheryavy, Andrey. (2017). The use of UAVs, SDN, and Augmented Reality for VANET Applications // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. pp. 364–368. 10.12783/dtce/aiie2017/18244.
3. Kirichek, Ruslan & Vladyko, Andrei & Paramonov, Alexander & Koucheryavy, Andrey. (2017). Software-defined architecture for flying ubiquitous sensor networking. 10.23919/ICACT.2017.7890076.
4. Bliail, Othmane & Ben Mamoun, Mouad & Redouane, Benaini. (2016). An Overview on SDN Architectures with Multiple Controllers // Journal of Computer Networks and Communications. 2016. 1–8. 10.1155/2016/9396525.
5. Bannour, Fetia & Souihi, Sami & Mellouk, Abdelhamid. (2017). Distributed SDN Control: Survey, Taxonomy and Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. PP. 1–1. 10.1109/COMST.2017.2782482.
6. C. N. Tadros, M. R. M. Rizk and B. M. Mokhtar. Software Defined Network-Based Management for Enhanced 5G Network Services // In IEEE Access, vol. 8, pp. 53997–54008, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980392
7. Singh, Ashutosh & Srivastava, Shashank. (2018). A survey and classification of controller placement problem in SDN // International Journal of Network Management. 28. e2018. 10.1002/nem.2018.
8. Kumari A., Sairam A. S. A Survey of Controller Placement Problem in Software Defined Networks // arXiv preprint arXiv:1905.04649. – 2019.
9. Gao C, Wang H, Zhu F, Zhai L, Yi S. A particle swarm optimization algorithm for controller placement problem in software defined network // Proceedings of the International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP'15). Zhangjiajie, China: Springer; 2015:44–54.
10. Liu S, Wang H, Yi S, Zhu F. Ncpsy: a solution of the controller placement problem in software defined networks // Proceedings of the International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP15). Zhangjiajie, China: Springer; 2015:213–225.
11. L. Liao and V. C. Leung. Genetic algorithms with particle swarm optimization based mutation for distributed controller placement in SDNs // In Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN), 2017 IEEE Conference on. IEEE, 2017, pp. 1–6.
12. K. S. Sahoo, A. Sarkar, S. K. Mishra, B. Sahoo, D. Puthal, M. S. Obaidat, and B. Sadun. Metaheuristic solutions for solving controller placement problem in SDN-based wan architecture, 2017.
13. K. S. Sahoo, D. Puthal, M. S. Obaidat, A. Sarkar, S. K. Mishra, and B. Sahoo. On the placement of controllers in software-Defined-WAN using meta-heuristic approach // J. Syst. Softw., vol. 145, pp. 180–194, Nov. 2018.
14. Q. Zhong, Y. Wang, W. Li, and X. Qiu. A min-cover based controller placement approach to build reliable control network in SDN // In Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2016 IEEE/IFIP. IEEE, 2016, pp. 481–487.
15. J. Li, Y. Wang, W. Li, and X. Qiu. Sharing data store and backup controllers for resilient control plane in multi-domain SDN // In Integrated Network and Service Management (IM), 2017 IFIP/IEEE Symposium on. IEEE, 2017, pp. 476–482.

16. Farshin, Alireza & Sharifian, Saeed. (2017). A Chaotic Grey Wolf Controller Allocator for Software Defined Mobile Network (SDMN) for 5th Generation of Cloud-based Cellular Systems (5G) // Computer Communications. 108. 10.1016/j.comcom.2017.05.003.
17. A. A. Ateya, A. Muthanna, A. Vybornova, A. D. Algarni, A. Abuarqoub, Y. Koucheryavy, and A. Koucheryavy. Chaotic salp swarm algorithm for SDN multi-controller networks // Eng. Sci. Technol., Int. J., vol. 22, no. 4, pp. 1001–1012, Aug. 2019.
18. Tubishat, Mohammad & Jaafar, Salinah & Alswaitti, Mohammed & Mirjalili, Seyedali & Idris, Norisma & Ismail, Maizatul Akmar & Omar, Mardian. (2020). Dynamic Salp Swarm Algorithm for Feature Selection. Expert Systems with Applications. 113873. 10.1016/j.eswa.2020.113873.
19. S. Wu, X. Chen, L. Yang, C. Fan, and Y. Zhao. Dynamic and static controller placement in software-defined satellite networking // Acta Astronautica, vol. 152, pp. 49–58, Nov. 2018.
20. B. Zhang, X. Wang, and M. Huang. Multi-objective optimization controller placement problem in Internet-oriented software defined network // Comput. Commun., vol. 123, pp. 24–35, Jun. 2018.
21. A. K. Singh, S. Maurya, and S. Srivastava. Varna-based optimization: A novel method for capacitated controller placement problem in SDN // Frontiers Comput. Sci., vol. 14, no. 3, Jun. 2020, 143402.

---

**Выборнова Анастасия Игоревна** – кандидат технических наук, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, [a.vybornova@gmail.com](mailto:a.vybornova@gmail.com)  
**Vybornova Anastasiya** – Candidate of Engineering Sciences, assistant professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, [a.vybornova@gmail.com](mailto:a.vybornova@gmail.com)

---