

## ВАРИАНТ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ КОНТЕНТОМ СЕТИ

С. В. КУЛЕШОВ, А. А. ЗАЙЦЕВА

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
199178, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: cher@iias.spb.su*

Рассматриваются особенности коммуникационной инфраструктуры на основе сети, управляемой контентом. Цель работы — решение задачи построения информационно-коммуникационной среды, обеспечивающей передачу данных от источников к потребителям и допускающей возможность программного реконфигурирования. Разработан подход к виртуализации среды передачи данных, основанный на инкапсуляции связанных компонентов, что позволяет рассматривать канал передачи данных как сервис либо виртуальную сущность, включающую в себя среду передачи, совокупность аппаратно-программных средств для преобразования потоков данных между различными физическими средами, аппаратно-программные средства управления транспортными потоками, а также аппаратно-программные средства кодирования-декодирования контента. Отличительной особенностью подхода является использование технологии активных данных (фрагментов кода, передаваемых по сети и выполняемых на сетевых узлах), что дает возможность рассматривать виртуальную среду передачи данных как распределенную виртуальную машину, а управление процессом виртуализации осуществляется активными данными. Для формализации подхода использованы и модифицированы многослойные графы, что позволило описывать не только топологию сети, но и внутреннюю структуру узлов на базе вычислительных (программных или аппаратных) компонентов и интерфейсов. В результате использования предложенного подхода разработана функциональная схема реализации распределенной информационно-коммуникационной среды, основанной на системе виртуальных машин. Рассмотрены и проанализированы варианты взаимодействия узлов и распределения исполнимого кода по узлам сети в такой среде.

**Ключевые слова:** *активные данные, виртуальная машина, цифровые программно-определяемые системы, киберфизические системы, распределенная сеть виртуальных машин*

**Введение.** В основе функционирования киберфизических систем лежит принцип плотного взаимодействия между вычислительными процессами и процессами физическими (включая обмен данными) [1—4]. К киберфизическим системам можно отнести различные информационные сети, обеспечивающие автоматизацию процессов управления и производства, например, „умные“ сети электроснабжения, автоматизированные системы управления в сельском хозяйстве, роботизированные комплексы управления беспилотным и автономным транспортом с учетом актуальной окружающей обстановки [5].

Во всех перечисленных случаях подразумевается наличие некоторой коммуникационной сети, а в более общем случае — коммуникационной инфраструктуры для обмена данными между всеми компонентами системы. Именно от качества функционирования такой инфраструктуры зависит эффективность всей киберфизической системы. Поэтому на первый план выходят вопросы построения правильной конфигурации среды передачи данных, которая будет соответствовать решаемой задаче, а если такая конфигурация не может быть опре-

делена на момент построения системы, то вопросы динамической адаптивной реконфигурации с подстройкой под требования задачи в „онлайн-режиме“.

В случае когда речь идет о программно-определяемой информационно-коммуникационной (ИК) инфраструктуре [6], следует рассматривать несколько ее компонентов: среду передачи данных, программно-реконфигурируемые узлы сети обмена данными; среду выполнения на узлах (процессор или виртуальную машину) для исполнимого кода (в том числе, активных данных [7]); контент, передаваемый в виде данных или программ и управляющий при этом ИК-процессами.

При этом представляет научный и технологический интерес решение следующих задач:

- построение ИК-среды, обеспечивающей передачу данных от источников к потребителям и допускающей возможность программного реконфигурирования;
- разработка принципов построения систем виртуальных машин активных данных, использование которых обеспечивает гибкость сети в целом за счет конфигурируемости отдельных устройств;
- разработка принципов взаимодействия узлов в распределенной системе виртуальных машин;
- разработка принципов снижения риска использования технологии активных данных в цифровых программно-определяемых системах.

Рассмотрим первую задачу более подробно.

**Виртуализация как основа программно-определяемой сети.** В работах [6, 8, 9] было показано, что ИК-среда, обеспечивающая передачу данных от источников к потребителям, дает возможность абстрагировать уровень приложения от уровня физической среды.

Виртуализация канала передачи данных, основанная на инкапсуляции связанных компонентов, позволяет рассматривать этот канал как сервис либо виртуальную сущность, включающую в себя среду передачи, совокупность аппаратно-программных средств для преобразования потоков данных между различными физическими средами, аппаратно-программные средства управления транспортными потоками, а также аппаратно-программные средства кодирования-декодирования контента.

Структура реализуемой среды передачи, в свою очередь, может содержать программно-определяемые и программно-управляемые компоненты, что соответствует некоторому стеку технологий, а также позволяет реализовать иерархическую структуру коммуникационных сред. Таким стеком технологий может быть, например, реализация Ethernet-канала, где программно-управляемым является сетевой контроллер, а программно-определяемыми будут компоненты протокола TCP/IP. Принцип вложенности программно-определяемых коммуникационных сред проиллюстрирован на рис. 1.

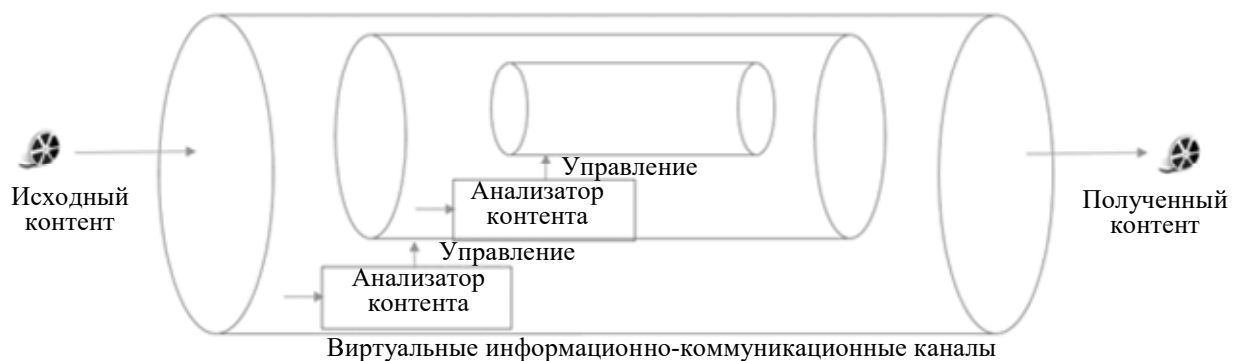


Рис. 1

При этом каждый следующий уровень может также быть виртуальным, программно-определяемым или программно-реконфигурируемым. Данные, предназначенные для передачи на каждом уровне ИК-иерархии, поступают на соответствующий анализатор контента (как

правило, программно-реализованный), который формирует управляющий набор команд, что позволяет реконфигурировать компоненты канала для оптимизации какого-либо параметра, определяемого целевой задачей.

Возможен вариант, когда ИК-каналы реализованы гетерогенной сетью, состоящей из управляемых и управляющих узлов, обеспечивающих объектное взаимодействие с использованием распределенной системы виртуальных машин активных данных. В этом случае полезная работа на всех доступных узлах выполняется посредством запуска активных данных только на одном из них. Такой подход представлен в работах [10—12], подобные подходы также используются в [13, 14] при разработке контент-ориентированной виртуальной архитектуры в распределенных цифровых сетях.

Используем формализацию такой гетерогенной сети в виде многослойного графа  $MLG$ , предложенного в [15] для моделирования многослойных мультисервисных телекоммуникационных систем, имеющих технологическую многоуровневую структуру, которая образована наложенными сетями.

В состав многослойного графа  $MLG=(\Gamma, V, E)$  включены [15]:

— множество подграфов  $\Gamma=\{\Gamma^1, \dots, \Gamma^l, \dots, \Gamma^L\}$ ,  $\Gamma^l=(V^l, E^l)$ , где подграф  $\Gamma^l$  описывает структуру сети на уровне  $l$ ;

— вершины  $v_i \in V$  и ребра  $e_k=(v_i, v_j)$ ,  $e_k \in E$ , обеспечивают связь подграфов  $\Gamma^l$  между собой.

Применительно к рассматриваемым гетерогенным сетям считаем, что вершины  $v_i \in V$  соответствуют программным или аппаратным реализациям некоторых функций физических узлов, а ребра  $e_k \in E$  являются интерфейсами между фрагментами сети. При этом каждый физический узел  $n_g \in N$  может содержать от одной до нескольких вершин  $v_i$  и столько же ребер  $e_k$ :

$$n_g = (\{v_1, \dots, v_i, \dots, v_V\}, \{e_1, \dots, e_k, \dots, e_E\}), \\ \{v_1, \dots, v_i, \dots, v_V\} \neq \emptyset, \{e_1, \dots, e_k, \dots, e_E\} \neq \emptyset.$$

Структура распределенной ИК-среды, основанной на системе виртуальных машин, описанной в [12], представлена на рис. 2. Каждый узел  $n_g$  содержит процессор, способный выполнять байт-код, а также блоки, анализирующие входящий контент (внутреннее состояние узла и окружение узла). Реализация блоков-анализаторов может быть как аппаратной, так и программной.

Блок анализатора контента может производить идентификацию типа контента по сигнатурам форматов и подготавливать соответствующие пары кодер/декодер на маршруте следования либо доопределять словари символов при использовании энтропийных алгоритмов сжатия на отдельных участках маршрута. Блок анализатора среды может определять доступность физических каналов связи для узлов-соседей и запрашивать их функциональные и ресурсные возможности.

В результате работы блоков анализаторов формируется конфигурация узла, включающая описание находящихся в узле  $n_g$  точек взаимодействия между уровнями графа  $\Gamma$  и интерфейсов, осуществляющих такое взаимодействие:

$$n_g = (\{v_1, \dots, v_i, \dots, v_V\}, \{e_1, \dots, e_k, \dots, e_E\}).$$

Также может производиться дополнительная работа по кодированию/декодированию контента или его ретрансляции последующим узлам в маршруте.

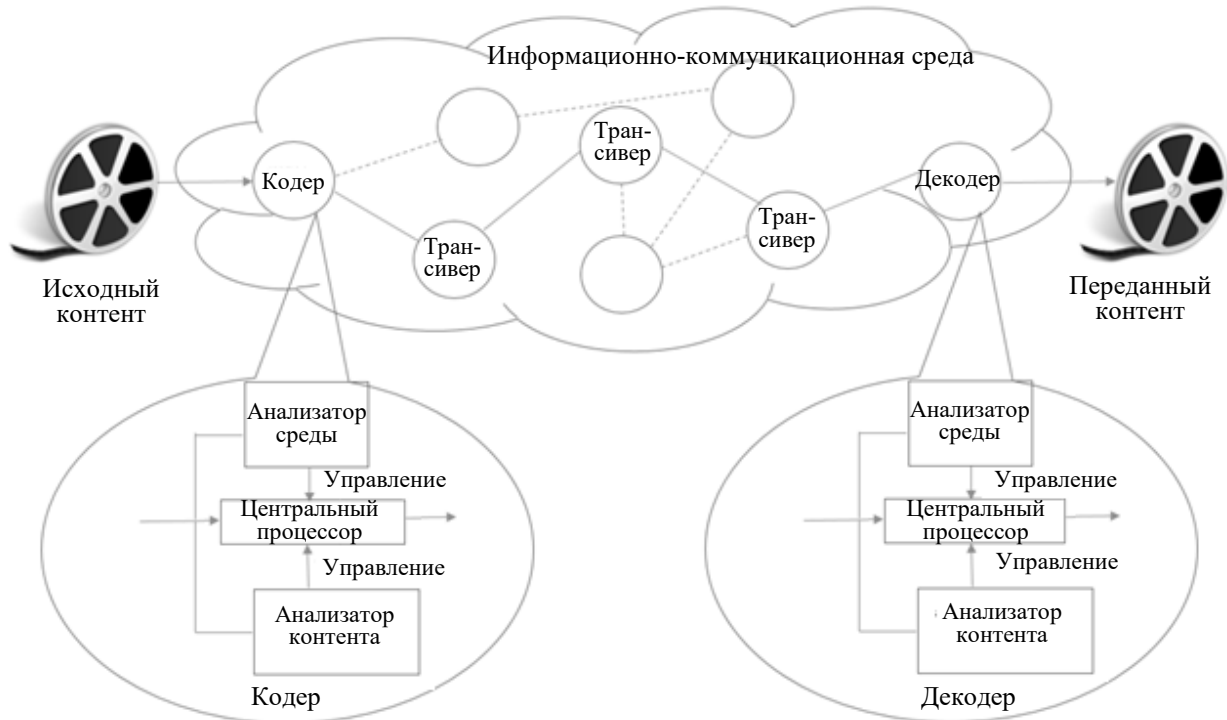


Рис. 2

Возможны следующие варианты взаимодействия узлов в такой ИК-среде:

— все узлы  $n_g$  содержат процессоры, которые взаимодействуют между собой для решения общей задачи — осуществления транспортной функции всей сети, но взаимодействуют они по некоторым, внешним по отношению к процессорам протоколам, а остальные узлы считаются самостоятельными устройствами;

— процессоры всех узлов  $n_g$  функционируют в составе распределенной многопроцессорной системы, решая общую задачу, при этом коммуникация между узлами является частью процесса межпроцессорного взаимодействия.

В общем случае в распределенной вычислительной среде фрагменты исполнимого кода  $c_i$ , распределяемые по узлам  $n_g$ , могут различаться в зависимости от локальных решаемых подзадач  $t_i \in T$ , где  $T$  — множество коммуникационных задач:

$$\exists i, j c_i \neq c_j \text{ при } t_i \neq t_j.$$

Особенность реализации предлагаемой системы заключается в том, что фрагменты исполнимого кода  $c_i$ , соответствующие вершинам  $v_i$  узла  $n_g$ , не должны отличаться, но при этом код должен быть универсальным, т.е. содержать все потенциально необходимые функции для каждой из возможных конфигураций узла  $n_g$ :

$$\forall i, j c_i = c_j \text{ при } t_i \neq t_j.$$

Это же условие предполагает свойство кроссплатформенности для кода активных данных.

Как было указано в [12], основой для реализации такой распределенной системы виртуальных машин может служить объектно-ориентированный подход к созданию распределенных приложений, когда каждый узел при объектном взаимодействии может выступать в качестве и ведущего, и ведомого. Такая распределенная система виртуальных машин допускает возможность асимметричного распределения заданий по узлам децентрализованной сети за счет создания объектов различного уровня декомпозиции.

Коммуникационная задача в этом случае может быть решена путем построения виртуальных каналов связи между узлами виртуальной машины, а управление процессом виртуализации осуществляется активными данными.

На рис. 3 схематично изображено динамическое построение ИК-инфраструктуры путем объединения узлов виртуальной машины (обозначены кругами) через выбранные каналы передачи данных (жирные стрелки) из множества потенциально доступных каналов (пунктирные стрелки). Пары узлов 1, 2 и 2, 3 образуют виртуальные каналы, при этом один из узлов выполняет роль передатчика-кодера, а второй — приемника-декодера. В случае транзитивности виртуальных каналов промежуточные узлы совмещают в себе функции кодирования и декодирования для смежных каналов, являясь транскодерами.

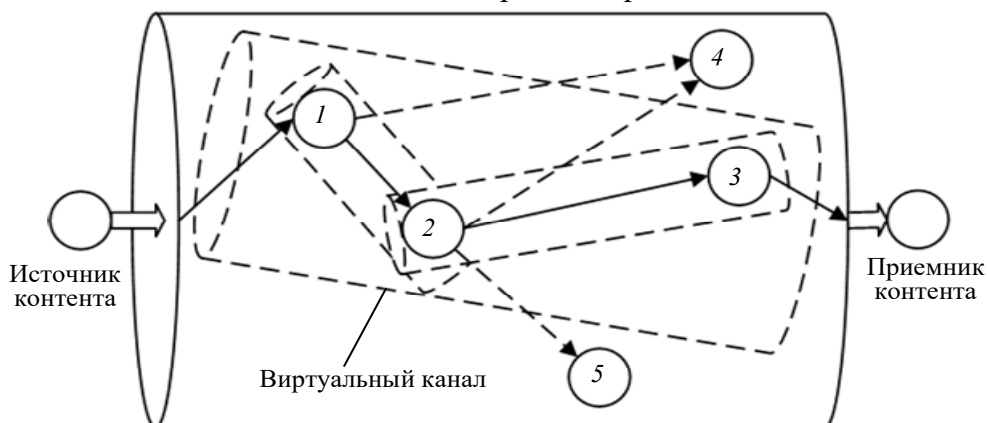


Рис. 3

**Заключение.** Предложен подход к виртуализации среды передачи данных, основанный на инкапсуляции связанных компонентов, что позволяет рассматривать канал передачи данных как сервис либо виртуальную сущность. Отличительной особенностью подхода является использование технологии активных данных (фрагментов кода, передаваемых по сети и выполняемых на сетевых узлах), что позволяет рассматривать виртуальную среду передачи данных как распределенную виртуальную машину, а управление процессом виртуализации осуществляется активными данными.

Для формализации подхода использованы и модифицированы предложенные в [15] многослойные графы *MLG*, применение которых позволило описывать не только топологию сети, но и внутреннюю структуру узлов на базе вычислительных (программных или аппаратных) компонентов и интерфейсов. Рассмотрены и проанализированы варианты взаимодействия узлов в такой информационно-коммуникационной среде и стратегии распределения исполнимого кода по узлам сети.

Перспективные исследования связаны с реализацией предлагаемого подхода в конкретных сетях передачи данных, в том числе при временном разворачивании мобильных сетей быстрого реагирования для покрытия заданных территорий.

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2020 г., № 0073-2019-0005.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова В. Н., Леонова А. Е., Логинова А. В., Черный Ю. Ю. Развитие информационных технологий и их эмерджентность в концепции киберфизической системы // Прикладная информатика. 2019. Т. 14, № 1 (79). С. 68—81.
2. Nguyen V.-C., Dinh N.-Th., Kim Y. A distributed NFV-enabled edge cloud architecture for ICN-based disaster management services // Sensors. 2018. N 18. DOI: 10.3390/s18124136.

3. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Щербакова Е. Е.* Проблемы проактивного управления социо-киберфизическими системами: современное состояние и перспективы решения // Информатизация и связь. 2020. № 2. С. 52—60.
4. *Левоневский Д. К.* Архитектура облачной системы распределения контента в киберфизических системах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 4 (27). С. 16—17.
5. Киберфизические системы в современном мире [Электронный ресурс]: <<https://habr.com/en/company/toshibarus/blog/438262/>>, 23.06.2020.
6. *Кулешов С. В., Юсупов П. М.* Софтверизация — путь к импортозамещению? // Тр. СПИИРАН. 2016. № 46. С. 5—13.
7. *Alexandrov V. V., Kuleshov S. V., Zaytseva A. A.* Active data in digital software defined systems based on SEMS structures // Smart Electromechanical Systems, Studies in Systems, Decision and Control. 2016. N 49. P. 61—69.
8. *Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В., Зайцева А. А.* Концепция построения инфотелекоммуникации (прототип SDR) // Тр. СПИИРАН. 2008. Вып. 6. С. 51—57.
9. *Kuleshov S. V., Aksenov A. Y., Zaytseva A. A.* Software-defined data formats in tele-communication systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. Vol. 575. P. 326—330.
10. *Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Aksenov A. Y.* The conceptual view of unmanned aerial vehicle implementation as a mobile communication node of active data transmission network // Intern. Journal of Intelligent Unmanned Systems. 2018. Vol. 6, iss. 4. P. 174—183. DOI: 10.1108/IJUS-04-2018-0010.
11. *Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Ronzhin A. L.* The development of soft defined distributed infocommunication systems architecture based on the active data technology // Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. N 95. P. 1—9. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7_25).
12. *Кулешов С. В., Зайцева А. А., Шальнев И. О.* Подход к реализации распределенной системы виртуальных машин для самоорганизующихся сетей // Информационно-управляющие системы. 2019. № 5. С. 30—37. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-5-30-37.
13. *Park Y., Yang H., Dinh Th., Kim Y.* Design and implementation of a container-based virtual client architecture for interactive digital signage systems // Intern. Journal of Distributed Sensor Networks. 2017. N 13 [Электронный ресурс]: <<https://doi.org/10.1177/1550147717717864>>.
14. *Liu Y., Yu S. Z.* Network coding-based multisource content delivery in content centric networking // J. of Network and Computer Applications. 2016. N 64. P. 167—175 [Электронный ресурс]: <<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.007>>.
15. *Агеев Д. В.* Метод проектирования телекоммуникационных систем с использованием потоковой модели для многослойного графа // Проблемы телекоммуникаций. 2010. № 2 (2). С. 7—22 [Электронный ресурс]: <[http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102\\_ageyev\\_layer.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_ageyev_layer.pdf)>.

**Сведения об авторах****Сергей Викторович Кулешов**

— д-р техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория автоматизации научных исследований; гл. научный сотрудник;  
E-mail: [kuleshov@iias.spb.su](mailto:kuleshov@iias.spb.su)

**Александра Алексеевна Зайцева**

— канд. техн. наук; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория автоматизации научных исследований; ст. научный сотрудник;  
E-mail: [cher@iias.spb.su](mailto:cher@iias.spb.su)

Поступила в редакцию  
02.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** *Кулешов С. В., Зайцева А. А.* Вариант информационно-коммуникационной инфраструктуры на основе управляемой контентом сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 1020—1026.

**VARIANT OF INFORMATION AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURE  
BASED ON A CONTENT-CONTROLLED NETWORK****S. V. Kuleshov, A. A. Zaytseva**

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,  
199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [cher@iias.spb.su](mailto:cher@iias.spb.su)*

Specifics of communication infrastructure based on a content-controlled network are discussed. The purpose is to solve the problem of constructing an information and communication environment that provides data transfer from sources to consumers and allows for the possibility of software reconfiguration. An approach to virtualization of the data transmission medium is developed, based on encapsulation of related components, which makes it possible to consider the data transmission channel as a service or a virtual entity including a transmission medium, a set of hardware and software tools for transforming data flows between different physical environments, hardware and software for controlling transport streams, as well as hardware and software for encoding-decoding content. A distinctive feature of the approach is the use of active data technology (code fragments transmitted over the network and executed on network nodes), which enables the virtual data transmission medium to be considered as a distributed virtual machine, while the virtualization process is controlled by active data. To formalize the approach, multilayer graphs are used and modified to describe not only the network topology, but also the internal structure of nodes based on computing (software or hardware) components and interfaces. Using the proposed approach, a functional diagram of the implementation of a distributed information and communication environment based on a system of virtual machines is developed. Variants of interaction between nodes and distribution of executable code among network nodes in such an environment are considered and analyzed.

**Keywords:** active data, virtual machine, digital software-defined systems, cyber-physical systems, distributed network of virtual machines

#### REFERENCES

1. Volkova V.N., Leonova A.E., Loginova A.V., Cherny Yu.Yu. *Journal of Applied Informatics*, 2019, no. 1(14), pp. 68–81. (in Russ.)
2. Nguyen V.-C., Dinh N.-Th., Kim Y. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2018, no. 18, pp. 4136, DOI:10.3390/s18124136.
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Shcherbakova E.E. *Informatizatsiya i svyaz'*, 2020, no. 2, pp. 52–60. (in Russ.)
4. Levonevskiy D.K. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii*, 2019, no. 4(7), pp. 16–17. (in Russ.)
5. <https://habr.com/en/company/toshibarus/blog/438262/>. (in Russ.)
6. Kuleshov S., Yusupov R. *Informatics and Automation* (SPIIRAS Proceedings), 2016, no. 46, pp. 5–13.
7. Alexandrov V.V., Kuleshov S.V., Zaytseva A.A. *Smart Electromechanical Systems, Studies in Systems, Decision and Control*, 2016, no. 49, pp. 61–69.
8. Alexandrov V.V., Kuleshov S.V., Tsvetkov O.V., Zaitseva A.A. *Informatics and Automation* (SPIIRAS Proceedings), 2008, no. 6, pp. 51–57 (in Russ.)
9. Kuleshov S.V., Aksenov A.Y., Zaytseva A.A. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, vol. 575, pp. 326–330.
10. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Aksenov A.Y. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2018, no. 4(6), pp. 174–183, DOI 10.1108/IJIUS-04-2018-0010.
11. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Ronzhin A.L. *CPS&C 2019, Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, 2020, no. 95, pp. 1–9, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7_25).
12. Kuleshov S.V., Zaytseva A.A., Shal'nev I.O. *Information and Control Systems*, 2019, no. 5, pp. 30–37, DOI:10.31799/1684-8853-2019-5-30-37.
13. Park Y., Yang H., Dinh Th. and Kim Y. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, no. 13, <https://doi.org/10.1177/1550147717717864>.
14. Liu Y., Yu S.Z. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, no. 64, pp. 167–175, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.007>.
15. [http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102\\_ageyev\\_layer.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_ageyev_layer.pdf).

#### Data on authors

- Sergey V. Kuleshov** — Dr. Sci.; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Research Automation; Chief Researcher; E-mail: [kuleshov@iias.spb.su](mailto:kuleshov@iias.spb.su)
- Alexandra A. Zaytseva** — PhD; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Research Automation; Senior Researcher; E-mail: [cher@iias.spb.su](mailto:cher@iias.spb.su)

**For citation:** Kuleshov S. V., Zaytseva A. A. Variant of information and communication infrastructure based on a content-controlled network. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 11. P. 1020—1026 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-1020-1026