

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-151-167>

Базовые элементы методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений

А. Б. Клименко ¹ ✉

¹ Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета, ул. Чехова, д. 2, г. Таганрог 347928, Российская Федерация

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является формирование комплекса базовых элементов методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств, функционирующих в составе систем распределенных вычислений на основе концепций туманных и краевых вычислений. Концепции туманных и краевых вычислений относительно новы и, невзирая на большой объем публикаций по этой теме, вопрос расходования ресурса вычислительных устройств с точки зрения значений ВБР не рассмотрен в литературе. Одновременно с этим, продление срока службы устройств в настоящее время крайне желательно, что делает данное исследование актуальным.

Методы. Основными научными методами, применяемыми в рамках данного исследования, являются анализ (предметных областей), численное моделирование и натурный эксперимент, подтверждающие целесообразность основных аспектов разрабатываемой методологии.

В рамках концепций туманных и краевых вычислений считается целесообразным сдвиг вычислительной нагрузки к источникам данных, которые, как правило, находятся на краю сети. Однако современные исследования не затрагивают оценок влияния такой стратегии в размещении функциональных задач на оценочные значения вероятности безотказной работы устройств, которая характеризует состояние остаточного ресурса устройства. Между тем, возрастание нагрузки на устройства меньшей вычислительной мощности, чем, допустим, устройство в пределах датацентра, приводит к ускорению их изнашивания, что, в свою очередь, выливается в экономические затраты на поддержание функционирующей вычислительной инфраструктуры. Одновременно с этим уменьшается нагрузка на промежуточные устройства сети, поскольку они передают уменьшенные объемы данных, а также увеличивается время, которое может быть использовано на обработку данных, в случае, если последнее производится на краевых устройствах. Разрабатываемая методология предлагает комплексный подход при размещении функциональных задач распределенных информационных систем, учитывающий перечисленные особенности использования концепций туманных и краевых вычислений.

Результаты. Основными результатами данного исследования является описание комплекса базовых методов, составляющих методологию снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений. Полученный комплекс опирается на разработанные модели и результаты проведенных экспериментальных исследований.

Заключение. В настоящее время, несмотря на массовое использование концепций туманных и краевых вычислений при реализации распределенных информационных систем, не было разработано единой методологии, которая позволила бы уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств и тем

самым продлить срок их службы. В рамках данной работы предлагается комплекс методов, дальнейшая проработка которых позволит увеличить срок службы устройств, составляющих вычислительную инфраструктуру систем распределенных вычислений.

Ключевые слова: краевые вычисления; надежность; распределенные системы; управление информационными системами.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Клименко А. Б. Базовые элементы методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 151-167. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-151-167>.

Поступила в редакцию 08.06.2022

Подписана в печать 03.08.2022

Опубликована 30.09.2022

The Basic Elements of Devices Resource Consumption Decreasing Metodology for Distributed Systems on the Basis of Fog- and Edge-Computing

Anna B. Klimenko ¹ ✉

¹ Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University
2 Chekhov str., Taganrog 347928, Russian Federation

✉ e-mail: anna_klimenko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to form a set of basic elements of the methodology for reducing the consumption of the residual resource of computing devices operating as part of distributed computing systems based on the concepts of fog and edge computing. The concepts of fog and edge computing are relatively new and, despite the large volume of publications on this topic, the issue of resource consumption of computing devices in terms of FBG values has not been considered in the literature. At the same time, extending the service life of devices is currently highly desirable, which makes this study relevant.

Methods. The main scientific methods used in this study are analysis (of subject areas), numerical simulation and natural experiment, confirming the feasibility of the main aspects of the developed methodology.

Within the framework of the concepts of fog and edge computing, it is considered appropriate to shift the computing load to data sources, which, as a rule, are located at the edge of the network. However, modern studies do not affect the estimates of the impact of such a strategy in the placement of functional tasks on the estimated values of the probability of non-failure operation of devices, which characterizes the state of the residual resource of the device. Meanwhile, an increase in the load on devices with less computing power than, say, a device within a data center leads to an acceleration of their wear, which, in turn, translates into economic costs for maintaining a functioning computing infrastructure. At the same time, the load on the intermediate network devices is reduced, since they transmit reduced amounts of data, and the time that can be used for data processing, if the latter is performed at the edge devices, increases. The developed methodology offers an integrated approach to the placement of functional tasks of distributed information systems, taking into account the listed features of using the concepts of fog and edge computing.

Results. *The main results of this study are the description of a set of basic methods that make up the methodology for reducing the consumption of the residual resource of computing devices of distributed computing systems based on fog and edge computing. The resulting complex is based on the developed models and the results of experimental studies.*

Conclusion. *Currently, despite the massive use of the concepts of fog and edge computing in the implementation of distributed information systems, there has not been developed a unified methodology that would reduce the consumption of resources of computing devices and thereby extend their service life. Within the framework of this work, a set of methods is proposed, the further development of which will increase the service life of devices that make up the computing infrastructure of distributed computing systems.*

Keywords: *edge computing; reliability; distributed systems; information systems management; decentralized control.*

Conflict of interest. *The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Klimenko A. B The Basic Elements of Devices Resource Consumption Decreasing Metodology for Distributed Systems on the Basis of Fog- and Edge-Computing. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 151-167 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-151-167>.

Received 08.06.2022

Accepted 03.08.2022

Published 03.09.2022

Введение

В настоящее время концепции туманных и краевых вычислений все шире применяются на практике. Основной тому причиной является валлообразное увеличение циркулирующих в сети данных, в частности, данных, подлежащих обработке в информационных системах и автоматических и автоматизированных информационно-управляющих системах. Данные должны передаваться от источников (различных сенсоров, видео-камер, КВЧ/СВЧ радаров и т.д.) к локациям программ обработки [1-5]. Однако в условиях географической разнесенности вычислительных компонентов системы становится чрезвычайно сложно обеспечивать должный уровень Quality of service по причине плохой предсказуемости времени доставки данных к месту обработки [6]. Концепция туманных вычислений (fog-com-

puting) и краевых вычислений (edge-computing) предполагает сдвиг обработки информации к ее источникам, как правило, к краю сети. При этом туманные вычисления используют промежуточные устройства, где принимается решение о том, отправлять данные в облачный сервис или обработать их на «туманном» узле, а краевые вычисления предполагают обработку данных непосредственно сообществами краевых устройств, например, состоящими в ЛВС организации [7-10]. Очевидно, что устройства, состоящие в датацентрах, на которых, собственно, происходит предоставление облачных сервисов, значительно превосходят вычислительными мощностями устройства туманного и краевого слоя сети. Кроме того, край сети динамичен – и тем самым осложняется решение функциональных задач (пользовательское устройство может оказаться вне зоны действия сети, может быть

выключено, может исчерпать запас батареи и т.д.). Проблема изменения инфраструктуры может быть решена путем перераспределения решаемых задач среди функционирующих устройств, однако любое решение такой задачи добавляет нагрузку на устройства. Таким образом, смещение вычислительной нагрузки к краю сети в угоду соответствия QoS приводит к тому, что устройства с относительно невысокой вычислительной мощностью работают в условиях повышенной нагрузки, что приводит к более быстрой выработке их ресурса.

Остаточный ресурс устройства оценивается значением вероятности безотказной работы (ВБР) на выбранный момент времени. В свою очередь, расчет ВБР для вычислительных устройств может быть произведен на основании оценки их загруженности.

Данный вопрос остался неосвещенным в публикациях, представленных в открытой печати.

В литературе [11-15] представлена подробная классификация направлений исследований в области туманных вычислений, а именно:

1. Управление вычислительными ресурсами.
2. Управление коммуникацией.
3. Организация взаимодействие облачного и туманного слоя.
4. Прикладные исследования для реализации систем здравоохранения.
5. Прикладные системы для сетей подвижных устройств.
6. «Умный» дом и «умный» город.

7. Алгоритмы по разделению вычислительных ресурсов.

8. Алгоритмы по организации хранения данных.

9. Алгоритмы, оптимизирующие энергопотребление.

Кроме того, «надежность» в рамках проводимых исследований туманных и краевых вычислений трактуется как «доступность» сервиса [16], в то время как вопросы сбережения остаточных ресурсов устройств не затронуты, несмотря на актуальность.

Поэтому, представляется целесообразной разработка эффективной методологии, ориентированной на бережное расходование остаточного ресурса устройств, принимающих участие в туманных либо краевых вычислениях и выраженного в ВБР устройства на заданный момент времени.

Материалы и методы

Модель оценки зависимости ВБР устройства от нагрузки

ВБР отдельного устройства описывается экспоненциальным законом. Более того, в соответствии с [17,18], ВБР и интенсивность отказов находится в зависимости от рабочей нагрузки на устройство, как показано в выражениях (1,2). Интенсивность отказов устройства описывается следующим выражением:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot 2^{\Delta T/10}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов устройства;

λ_0 – интенсивность отказов ненагруженного устройства;

ΔT – температура устройства.

Так как температура устройства зависит от рабочей нагрузки, то, в соответствии с [9]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot 2^{kD/10}, \quad (2)$$

где D – процент загруженности устройства;

k – коэффициент пропорциональности между загруженностью и температурой устройства.

Модель оценки влияния применения концепций туманных/краевых вычислений на ВБР устройства с точки зрения устройства, производящего вычисления

Исходя из того, что ВБР устройства рассчитывается в соответствии с экспоненциальным законом, будем полагать, что

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{kW/10} P t}, \quad (3)$$

где W – суммарная трудоемкость операций, совершаемых устройством,

k – коэффициент, связывающий загруженность устройства и температуру,

T – время, отводимое на выполнение решения функциональных задач, включая задачи передачи и приема данных,

P – производительность вычислительного устройства,

t – время, для которого производится расчет ВБР.

Суммарная трудоемкость операций для устройства, которое работает как транзитное, т.е., передает данные на другие устройства, вычисляется как

$$W = W_r + W_s + \sum W_{tr}, \quad (4)$$

где W_s – трудоемкость операций отправки данных в сеть,

W_r – трудоемкость операций получения данных из сети.

В случае, если на узел переносится функциональная задача, получаем следующее:

$$W' = W_r + W_s' + \sum W_{tr} + W_f, \quad (5)$$

где W_s является трудоемкостью передачи данных без обработки в облако.

W_s' является трудоемкостью при передаче данных в облако после предварительной обработки.

Таким образом, для отдельного устройства перенос на него вычислительной нагрузки в целом имеет негативное влияние, как показано на рис.1 (график Pt2 расположен ниже и иллюстрирует результат повышения вычислительной нагрузки на устройство). Однако оно может быть частично нивелировано за счет сокращения передаваемых данных, что отражается на трудоемкости W_s' .

Также на рис.1 видно, что, несмотря на некоторое сокращение объема передаваемых после предварительной обработки данных и, следовательно, генерируемой при этом загруженности устройства, значения ВБР хуже, чем в ситуации, когда устройство передает данные без обработки.

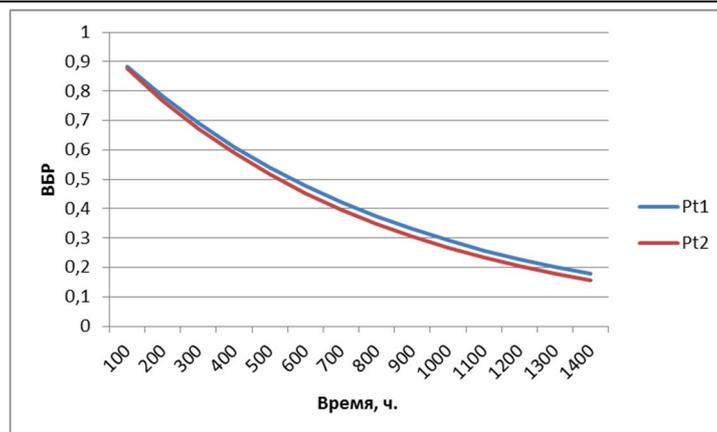


Рис. 1. Пример снижения значения ВБР краевого устройства при переносе на него дополнительной вычислительной нагрузки

Fig.1. The example of reliability value decrease due to the computational workload increase

Модель оценки влияния размещения функциональных задач ИС на ВБР устройства с точки зрения транзитных устройств

Для устройства, которое осуществляет транзит данных, перенос их обработки на предыдущие узлы приводит к уменьшению нагрузки на передачу данных, а именно:

$$W = \sum W_{tr} - \sum W_{пер} , \quad (6)$$

где $W_{пер}$ – трудоемкость передачи данных, которые прошли предварительную обработку на устройстве туманно-го/краевого слоя сети.

Модель оценки влияния размещения функциональных задач ИС на ВБР группы устройств

ВБР для группы устройств оценивается как произведение их ВБР, а именно [19]:

$$P(t) = \prod P_i(t) . \quad (7)$$

Таким образом, для сравнения влияния переноса вычислительной нагрузки, следует сравнивать значения ВБР

устройств с учетом того, что на крайнем устройстве объем вычислений увеличивается, а на устройствах, которые ранее были транзитными и участвовали исключительно в передаче данных, объем вычислений уменьшается.

На примере цепочки из четырех устройств рассмотрим влияние переноса нагрузки.

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_4(t) . \quad (8)$$

Учитывая выражения (3, 6, 7) для оценки влияния загруженности устройств, получим следующие графики, демонстрирующие влияние переноса нагрузки на ВБР группы устройств.

На графике рис. 2 видно, что значения ВБР группы устройств, реализующих вычисления на краю, выше – это происходит по крайней мере за счет сокращения нагрузки, генерируемой необходимостью передачи больших объемов данных. При этом необходимо учитывать, что значения ВБР устройства, осуществляющего обработку, ухудшаются за счет повышения нагрузки.

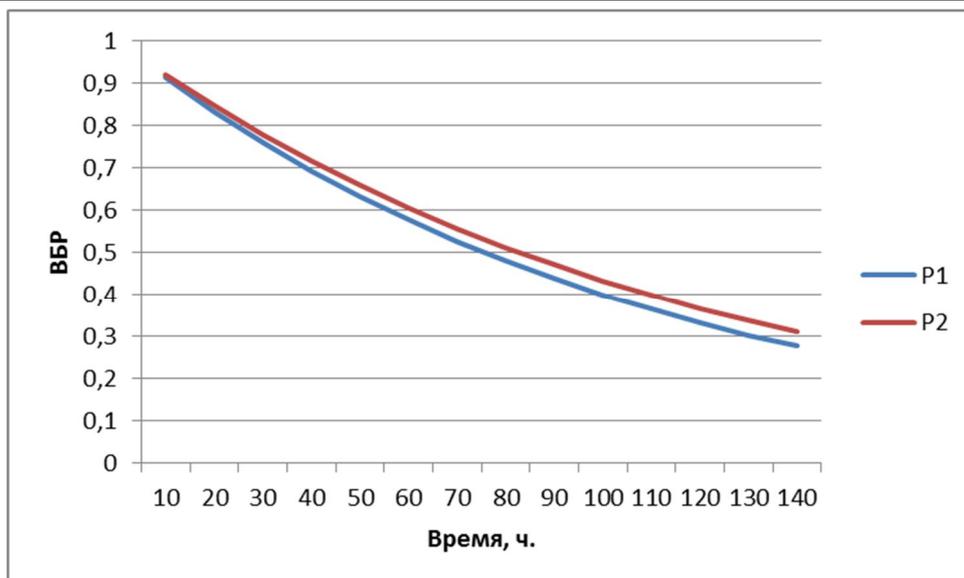


Рис. 2. Иллюстрация ситуации увеличения значений ВБР группы устройств в случае переноса функциональной задачи обработки на устройство туманного/краевого слоя сети

Fig. 2. The illustration of device group reliability increase in case of shift of the functional task to the fog-edge-device

Модель оценки увеличения времени на обработку данных

Опираясь на представленные модели оценки влияния переноса нагрузки на ВБР отдельного устройства и на ВБР группы устройств, можно сделать предварительные выводы, а именно:

- перенос нагрузки на краевое устройство меньшей производительности негативно влияет на значения его ВБР;
- за счет существенного уменьшения объема транзитных данных, значения ВБР группы устройств повышается.

Рассмотрим описанную ситуацию переноса вычислительной нагрузки с точки зрения временных затрат.

Время передачи данных складывается из следующих компонентов:

- время приема данных из сети;
- время отправки данных в сеть.

Временем передачи по каналу связи можно пренебречь.

Таким образом, время передачи от узла А в узел В можно оценить как сумму времен приема и передачи данных по всем промежуточным узлам от источника данных до приемника. То есть, для цепочки из N узлов, время передачи данных будет оцениваться как:

$$T_0 = \sum_{i=1}^N (t_{\text{receive}}^i(V_{\text{receive}}) + t_{\text{send}}^i(V_{\text{send}})). \quad (9)$$

При этом время приема-передачи в сеть зависит от объема принимаемых и передаваемых данных.

Пусть зависимость между временем приема-отправки данных и их объемами имеет следующий вид:

$$t_{\text{receive}} = \zeta V_{\text{receive}}; \quad t_{\text{send}} = \zeta V_{\text{send}}.$$

Таким образом, сравнивая ситуации передачи данных в облако и обработки

данных на краевом устройстве, могут быть получены следующие оценки (при допущении, что после обработки объем данных уменьшается, например, в 4 раза).

Для варианта обработки данных в облаке:

$$T_1 = 4\zeta(V_{\text{receive}} + V_{\text{send}}). \quad (10)$$

Для варианта обработки на краевом устройстве:

$$T_2 = \zeta(V_{\text{receive}} + 0,25V_{\text{send}}) + 1,5\zeta V_{\text{send}} = \zeta(V_{\text{receive}} + 1,75V_{\text{send}}). \quad (11)$$

Таким образом, время сокращается до 2,9 раз относительно передачи пол-

ного объема данных без предварительной разработки.

При этом, если данные не передаются дальше краевого или туманного устройства-обработчика, тенденции сокращения времени усиливаются.

Проведенный эксперимент по передаче данных из Ростова-на-Дону на узел, расположенный в датацентре в Калифорнии (сервис Amazon), продемонстрировал следующее (рис.3).

На основании результатов натурального эксперимента сделаем допущение о том, что при удвоении объема передачи данных происходит увеличение времени передачи в 2,5-4 раза.

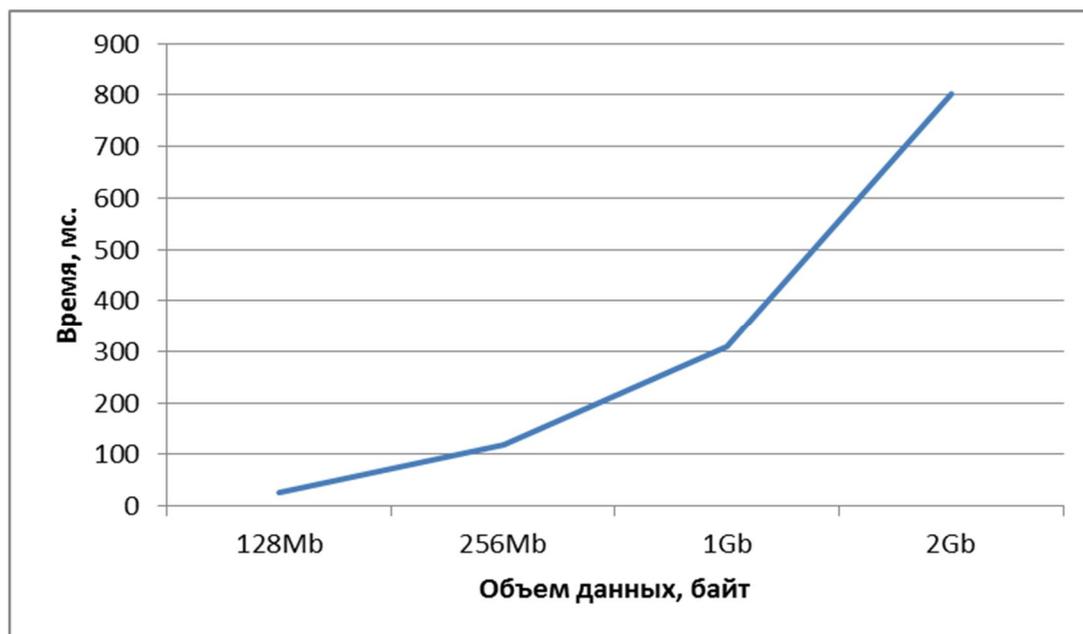


Рис. 3. Зависимость времени передачи данных от их объема

Fig. 3. The dependence between the data transfer time and the data volume

Оценка влияния функциональных задач на ВБР группы устройств с учетом увеличения времени на обработку данных

Ранее было показано, что при уменьшении объемов передаваемых данных по

сети уменьшается и время, необходимое на их передачу. Проведенный натуральный эксперимент подтвердил тенденцию, полученную аналитически.

Таким образом, при приближении обработки данных к их источнику, по-

является дополнительное время, которое может быть использовано для расширения временного интервала, отводимого краевому устройству для обработки данных. Также это время может быть использовано для расширения временного интервала, необходимого для отправки и получения данных промежуточными узлами. Опираясь на выражения (3, 6, 7) оценим эффект добавления времени на ВБР группы устройств (рис.4, 5).

Проиллюстрируем результат оценки значений ВБР для краевого устройства, после перенесения на него вычислительной нагрузки и добавления времени на ее выполнение (рис. 6).

На рис. 6 показано, что значения ВБР краевого устройства в условиях повышения вычислительной нагрузки и увеличения времени на ее выполнение, увеличиваются. Следовательно, этот подход мо-

жет быть использован для нейтрализации влияния дополнительной нагрузки на использование ресурса устройства.

Базовые положения методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений

Таким образом, опираясь на разработанные модели, результаты натурного эксперимента и компьютерного моделирования, были получены оценки, которые позволяют сделать следующие важные выводы:

– для распределенной географически информационной системы, при переносе вычислительной нагрузки на краевые устройства или устройства туманного слоя меньшей производительности, значения ВБР этих устройств снижаются по сравнению со значениями в условиях передачи данных в облако;

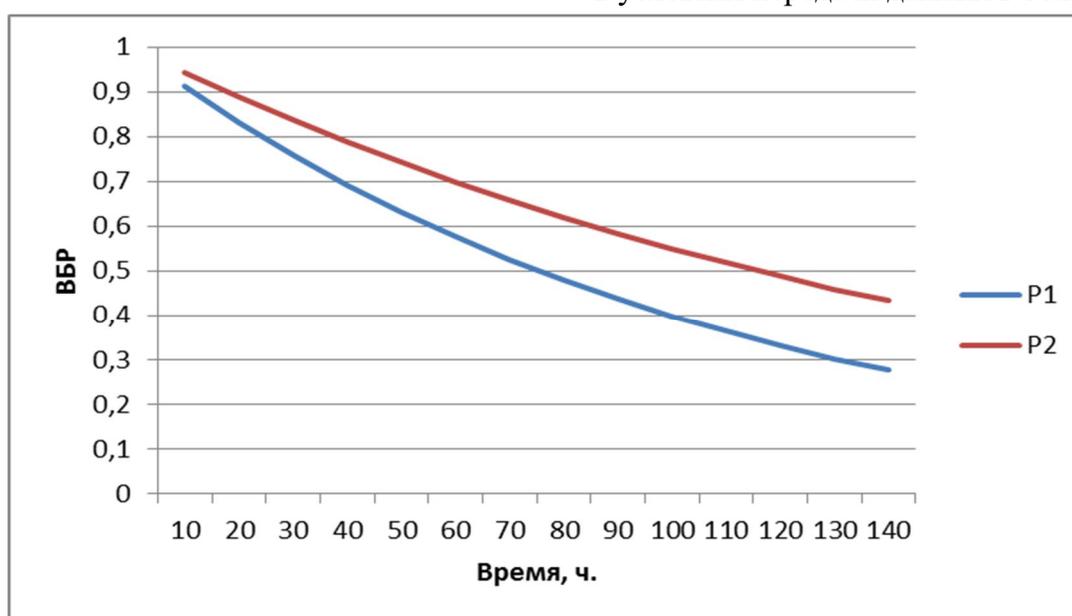


Рис. 4. Дополнительное время выделено на задачи передачи и получения данных в цепочке устройств

Fig. 4. The additional time is given for the data transfer tasks

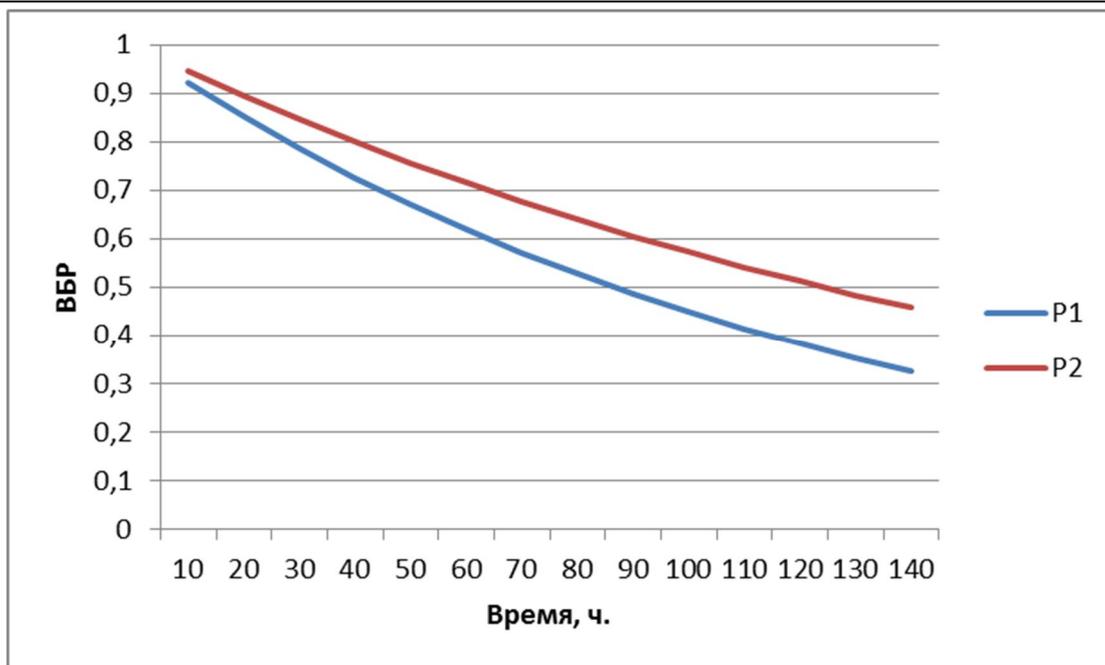


Рис. 5. Иллюстрация результата добавления 70% дополнительного времени на выполнение функциональной задачи для краевого устройства и 30% на прием-передачу данных

Fig. 5. The illustration of 70% extra-time addition to the edge-device task performing and of 30% extra-time addition to the data transfer tasks implementation

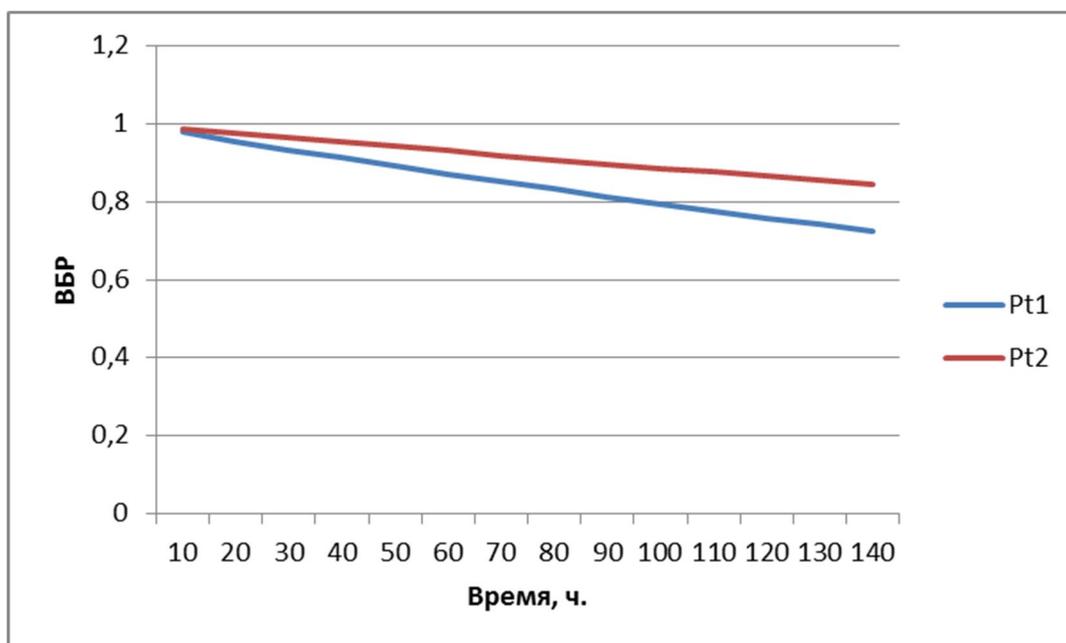


Рис. 6. Сравнение ВБР краевого устройства для ситуации с выполнением функциональной задачи и для ситуации выполнения этой же задачи в условиях выделения дополнительного времени

Fig. 6. A comparison of the edge device reliability functions for the cases of functional task performing and functional task performing under extra-time conditions

– однако в случае переноса вычислительной нагрузки на край сети, существенно уменьшается загруженность промежуточных устройств, за счет чего увеличивается значение ВБР этих устройств, и для группы устройств оценка ВБР улучшается;

– также в случае переноса обработки данных на край сети последующие промежуточные устройства передают в облако значительно меньшие объемы данных, что также уменьшает необходимое для этого время. Полученное таким образом дополнительное время может быть добавлено ко времени выполнения функциональной задачи на краевом устройстве, за счет чего может быть снижена его загруженность и, следовательно, повышена ВБР.

Основные компоненты разрабатываемой методологии опираются на перечисленные выше утверждения. Таким образом, основные компоненты методологии будут следующими:

– метод снижения расхода ресурсов устройств краевого и туманного слоя сети (за счет использования дополнительного времени для снижения загруженности),

– метод выбора устройств для размещения функциональных задач,

– метод снижения расхода ресурсов устройств краевого и туманного слоя сети в условиях высокой динамики инфраструктуры.

Следует отметить, что выбор устройств для размещения функциональных задач является отдельной ком-

плексной задачей, решаемой в рамках описанной проблемы и непосредственно связан с процедурой реконфигурации, которая неизбежна в системах с высокой динамикой устройств. В связи с этим возникают следующие вопросы:

– сбор данных об устройствах, функционирующих в рамках системы. Обоснование выбора способа сбора и поддержания актуальности данных: разовые опросы устройств либо поддержание функционирования распределенного реестра данных с точки зрения загруженности устройств;

– формирование групп устройств в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры.

Формирование групп устройств также является комплексной задачей, учитывая ограничения на время ее выполнения и ограничения на используемые ресурсы. В связи с этим одной из подзадач формирования групп устройств будет сокращение времени решения распределительной задачи, в том числе, за счет рационального формирования поискового пространства [20].

Результаты и их обсуждение

В данной работе поставлена актуальная задача разработки методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений. Внимание акцентируется на устройствах туманного и краевого слоев с целью увеличения срока их службы и, соответ-

ственно, стоимости эксплуатации системы. Остаточный ресурс оценивается значением ВБР устройства. Следует отметить, что в рамках данной работы использовано допущение о том, что для каждого устройства неизвестно время его функционирования и, соответственно, степень изношенности. Поэтому предполагается применение единой стратегии по увеличению значений ВБР для всех устройств-участников.

Разработанные аналитические модели позволили сделать вывод о том, что, во-первых, перемещение вычислительной нагрузки на устройства меньшей вычислительной мощности снижают их значения ВБР на выбранном временном интервале. Однако для группы устройств, включая промежуточные устройства, служащие для транзита данных в облако, в целом оценочное значение ВБР повышается, за счет снижения той нагрузки, которая генерируется при передаче данных промежуточными устройствами.

При этом, перемещая вычислительную нагрузку к краю сети, и оставляя необходимость передачи частично обработанных данных в облако, мы получаем выигрыш в виде дополнительного времени за счет общего уменьшения времени передачи данных меньшего объема. Предложенные значения изменения потребления времени приведены без учета возможного уменьшения пути данных в случае, если финальная обработка также производится на устройстве краевого или туманного слоя и поэтому являются нижней оценкой возможного выигрыша во времени. Однако, как показано на графиках рис. 4 и 5, в случае распределения экстра-времени для передачи данных, значения ВБР группы устройств повышается до 10%, а в случае распределения 70% полученного дополнительного времени на решение функциональной задачи, значения ВБР группы устройств повышается до 15%, при этом для краевого устройства происходит повышение значений ВБР до 7% по результатам эксперимента.

Таблица 1. Результаты моделирования влияния переноса вычислительной нагрузки на ВБР устройств и групп устройств

Table 1. Results of modeling the impact of the transfer of computational load on the VBR of devices and groups of devices

	Применение концепции туманных вычислений / Application of the concept of foggy computing	Применение концепции туманных вычислений и распределение нагрузки во времени / Application of the concept of foggy computing and load distribution over time
ВБР краевого устройства	Ухудшение до 5%	Улучшение до 15%
ВБР группы устройств, включая краевое	Улучшение до 3%	Улучшение до 7%

Поэтому методология, основанная на распределении вычислительной нагрузки по дополнительному времени, появление которого является результатом использования концепции туманных и краевых вычислений, представляется перспективной с точки зрения ресурсосбережения устройств, принимающих участие в вычислительном процессе.

Выводы

В настоящее время туманные и краевые вычисления обретают популярность в силу необходимости повышения качества сервисов, а также загрузки сетевой инфраструктуры. Однако практически не уделено внимания такому аспекту эксплуатации распределенных информационных систем на основе краевых и туманных вычислений, как срок службы устройств туманного и краевого слоев сети. Возможность продления срока службы таких устройств оказывает позитивный эффект на стоимость эксплуатации распределенных информационных систем, поэтому снижение расхода ресурсов устройств является актуальной современной проблемой, охватывающей многие классы технических систем.

В рамках исследований туманных и краевых вычислений не уделено внима-

ние такому подходу к ресурсосбережению, поэтому вполне очевидна необходимость разработки методологии, ориентированной на сохранение остаточного ресурса вычислительных устройств.

Данная работа посвящена формированию теоретических основ методологии снижения расхода остаточного ресурса вычислительных устройств систем распределенных вычислений на основе туманных и краевых вычислений. На основе аналитических моделей, сделаны выводы о том, что перенос дополнительной нагрузки на устройство снижает его значения ВБР, при этом, однако, повышаются значения ВБР устройств, ранее передающих большие объемы данных в облако. Тем не менее, концепции туманных и краевых вычислений предполагают обработку данных на краю сети (в туманном слое), в результате чего существенно снижается объем данных, передаваемых в облако, и, следовательно, снижается время, для этого необходимое. Использование дополнительного времени с целью распределения вычислительной нагрузки на устройство и снижение таким образом загруженности вычислителя приводят к повышению значений ВБР как самого устройства, так и группы устройств, участвующих в вычислениях.

Список литературы

1. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Moscholios I. (2018). Towards Distributed Data Management in Fog Computing // *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2018/7597686>

2. Aazam M., Zeadally S., Harras K. A. Offloading in fog computing for IoT: Review, enabling technologies, and research opportunities. *Future Generation Computer Systems*. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.057>

3. Fog computing in healthcare Internet of Things: A case study on ECG feature extraction / T. N. Gia, M. Jiang, A. M. Rahmani, T. Westerlund, P. Liljeberg, H. Tenhunen // *Proceedings - 15th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2015, 14th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2015, 13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Self-Adaptive Systems, DAS 2015*, 2015. 356–363. <https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.51>

4. Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R. CLOUD ROBOTIC PLATFORM ON BASIS OF FOG COMPUTING APPROACH // *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11097 LNAI. P. 34-43.

5. Ануфриева Н.Ю., Мещеряков Р.В., Шевцова Г.А. Оценивание результативности работы центра информационного обслуживания // *Труды СПИИРАН*. 2010. № 3 (14). С. 76-90. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2012. Т. 55. № 11. С. 63-66.

6. Liu, Kangkai & Guo, Linhan & Wang, Yu & Chen, Xianyu. (2020). Timely Reliability Analysis of Virtual Machines Considering Migration and Recovery in an Edge Server. *Sensors*. 10.3390/s21010093.

7. Stojmenovic I., Wen S. The Fog Computing Paradigm: Scenarios and Security Issues. *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 2014, 2, 1–8. <https://doi.org/10.15439/2014F503>

8. Big data processing in cloud computing environments / A. Noraziah, M. A. I. Fakherldin, K. Adam, M. A. Majid // *Advanced Science Letters*. 2017/ <https://doi.org/10.1166/asl.2017.10227>

9. Aazam M., Huh E. N. E-HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service // *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops, PerCom Workshops 2015*, 518–523. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2015.7134091>

10. al Faruque M. A., Vatanparvar K. Energy Management-as-a-Service over Fog Computing Platform // *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(2), 161–169. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2471260>

11. A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges / C. Mouradian, D. Naboulsi, S. Yangui, R.H. Glitho, M.J. Morrow, P.A. Polakos // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20, 416-464.

12. Vehicular Fog Computing: A Viewpoint of Vehicles as the Infrastructures” / X. Hou, Y. Li, M. Chen, D. Wu, D. Jin, S. Chen // “*IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jun. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 3860 – 3873.

13. R. Brzoza - Woch, M. Konieczny, P. Nawrocki, T. Szydło, and K. Zielinski “Embedded systems in the application of fog computing - Levee monitoring use case” // *11th IEEE Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*, 2016, pp. 1 – 6.

14. Xu Y., Mahendran V., Radhakrishnan S. "Towards SDN - based fog computing: MQTT broker virtualization for effective and reliable delivery" // 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2016, pp. 1 – 6.
15. M. Aazam and E. - N. Huh, "E - HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service" // IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), 2015, pp. 518 – 523.
16. Inaltekin H., Gorlatova M., Mung C. (2017). Virtualized Control over Fog: Interplay Between Reliability and Latency. *CoRR, abs/1712.0*. <https://arxiv.org/pdf/1712.00100.pdf>
17. А., S. Dolgovechnost Integralnih schem I proizvodstvenniye metody ee prognozirovaniya. *ChipNews*, 2002, 6, 44–49.
18. Melnik E., Korovin I., Klimenko A. Improving dependability of reconfigurable robotic control system // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): 2017. Vol. 10459 LNAI*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66471-2_16
19. Тимошенко С. П., Симонов Б. М., Горошко В. Н. Основы теории надежности. М.: Изд-во «Юрайт», 2019. 445 с. URL: <https://urait.ru/bcode/433079> (дата обращения: 12.04.2022).
20. Klimenko A., Safronenkova I. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology. 2019. 10.1007/978-3-030-30329-7_4.

References

1. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Moscholios I. (2018). Towards Distributed Data Management in Fog Computing. *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2018/7597686>
2. Aazam M., Zeadally S., Harras K. A. Offloading in fog computing for IoT: Review, enabling technologies, and research opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.057>
3. Gia T. N., Jiang M., Rahmani A. M., Westerlund T., Liljeberg P., Tenhunen H. Fog computing in healthcare Internet of Things: A case study on ECG feature extraction. *Proceedings - 15th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2015, 14th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2015, 13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Se*, 2015, 356–363. <https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.51>
4. Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R. Cloud robotic platform on basis of fog computing approach. *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11097 LNAI, pp. 34-43.
5. Anufrieva N.Yu., Meshcheryakov R.V., Shevtsova G.A. Otsenivanie rezul'tativnosti raboty tsentra informatsionnogo obsluzhivaniya [Evaluation of the effectiveness of the in-

formation service center]. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAN*, 2010, no 3 (14), pp. 76-90. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = News of higher educational institutions. Instrumentation*.

6. Liu Kangkai, Guo, Linhan, Wang Yu, Chen Xianyu. (2020). Timely Reliability Analysis of Virtual Machines Considering Migration and Recovery in an Edge Server. *Sensors*. 10.3390/s21010093.

7. Stojmenovic I., Wen S. The Fog Computing Paradigm: Scenarios and Security Issues. *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 2014, 2*, 1–8. <https://doi.org/10.15439/2014F503>

8. Noraziah A., Fakherldin M. A. I., Adam K., Majid M. A. Big data processing in cloud computing environments. *Advanced Science Letters*. 2017. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.10227>

9. Aazam M., Huh E. N. E-HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service. *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops, PerCom Workshops 2015*, 518–523. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2015.7134091>

10. al Faruque M. A., Vatanparvar K. Energy Management-as-a-Service over Fog Computing Platform. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(2), 161–169. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2471260>

11. Mouradian C., Naboulsi D., Yangui S., Glitho R.H., Morrow M.J., Polakos P.A. A Comprehensive Survey on Fog Computing: State-of-the-Art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20, 416-464.

12. Hou X., Li Y., Chen M., Wu D., Jin D., Chen S., “Vehicular Fog Computing: A Viewpoint of Vehicles as the Infrastructures,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jun. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 3860 – 3873.

13. Brzoza - Woch R., Konieczny M., Nawrocki P., Szydło T., Zielinski K. “Embedded systems in the application of fog computing - Levee monitoring use case”. *11th IEEE Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*, 2016, pp. 1 – 6

14. Xu Y., Mahendran V., Radhakrishnan S. “Towards SDN - based fog computing: MQTT broker virtualization for effective and reliable delivery” *8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, 2016, pp. 1 – 6.

15. Aazam M., E. - N. Huh, “E - HAMC: Leveraging Fog computing for emergency alert service”. *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, 2015, pp. 518 – 523.

16. Inaltekin H., Gorlatova M., Mung C. (2017). Virtualized Control over Fog: Interplay Between Reliability and Latency. *CoRR, abs/1712.0*. <https://arxiv.org/pdf/1712.00100.pdf>

17. A., S. Dolgovechnost Integralnih schem I proizvodstvenniye metody ee prognozirovaniya. *ChipNews*, 2002, 6, 44–49.

18. Melnik E., Korovin I., Klimenko A. Improving dependability of reconfigurable robotic control system. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes*

in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2017, vol. 10459 LNAI. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66471-2_16

19. Timoshenkov S. P., Simonov B. M. , Goroshko V. N. *Osnovy teorii nadezhnosti*. [Fundamentals of reliability theory]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 445 p. Available at: <https://urait.ru/bcode/433079> (accessed: 12.04.2022).

20. Klimenko A., Safronenkova I. A Technique of Workload Distribution Based on Parallel Algorithm Structure Ontology, 2019. 10.1007/978-3-030-30329-7_4.

Информация об авторе / Information about the Author

Клименко Анна Борисовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>

Anna B. Klimenko, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Research Fellow, Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: anna_klimenko@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6527-8108>