

Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры

А. Б. Клименко¹ ✉

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 подбор метода управления распределенной системой, который бы, на основании известных параметров, позволил уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств. Под ресурсом информационной системы понимается вероятность безотказной работы (ВБР), которая снижается с течением времени для каждого узла, тем быстрее, чем выше его загруженность.

Методы. Учитывая, что при высокой динамике краевого слоя сети частота реконфигураций системы становится относительно высокой, а необходимость реконфигураций непредсказуема, снижение общего времени, затрачиваемого на реконфигурации, позволяет увеличить время, затрачиваемое на решение функциональных вычислительных задач системы, и тем самым снизить загруженность узлов. Время реконфигурации может быть уменьшено как за счет уменьшения времени детекции отказа в распределенной системе, так и за счет уменьшения времени поиска новой конфигурации. В данной работе рассмотрен способ снижения времени детекции отказов. Анализ применимости методов управления системой (централизованный, с распределенным лидером, децентрализованный) производится на основе полученных аналитических оценок времени детекции системой отказа в условиях управления посредством того или иного метода. Численный эксперимент позволяет выделить области параметров систем, где предпочтительно использование метода с распределенным лидером.

Результаты. Основным результатом данной работы является методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры, ориентированная на уменьшение расхода ресурсов вычислительных устройств.

Заключение. Время реконфигурации системы может быть сокращено за счет выбора наиболее подходящего метода управления. Таким образом увеличивается время, отводимое на решение функциональных задач приложения, снижается загруженность вычислительных узлов и, следовательно, повышаются значения ВБР на протяжении горизонта планирования.

Ключевые слова: крайевые вычисления; надежность; распределенные системы; реконфигурация; управление информационными системами; децентрализованное управление; распределенный лидер.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-29-03229 и 18-29-22093.

Для цитирования: Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 57-72. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72>.

Поступила в редакцию 06.02.2022

Подписана в печать 25.02.2022

Опубликована 31.03.2022

A Technique of the Distributed Information Systems Control Method Choice under the High Network Dynamics Conditions

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 select a method for managing a distributed system, which, based on known parameters, would reduce the consumption of resources of computing devices. The resource of an information system is understood as the probability of failure-free operation (reliability function), which degrades over time for each node, the faster, the higher its workload.

Methods. Considering that with high dynamics of the edge layer of the network, the frequency of system reconfigurations becomes relatively high, and the need for reconfigurations is unpredictable, reducing the total time spent on reconfigurations makes it possible to increase the time spent on solving functional computational problems of the system and thereby reduce the load of nodes. The reconfiguration time can be reduced both by reducing the time for detecting a failure in a distributed system, and by reducing the new configuration forming time. In this paper, a method for reducing the time of the failure detection is considered. The analysis of the applicability of system control methods (centralized, with a distributed leader, decentralized) is based on the obtained analytical estimates of the time the system detects a failure under control conditions using one method or another. A numerical experiment makes it possible to identify areas of system parameters, where it is preferable to use the method with a distributed leader.

Results. The main result of this work is a methodology for choosing a method for managing distributed information systems in conditions of high dynamics of the network infrastructure, focused on reducing the consumption of resources of computing devices.

Conclusion. System reconfiguration time can be shortened by choosing the most appropriate control method. Thus, the time allotted for solving the functional tasks of the application increases, the workload of the computational nodes decreases, and, therefore, the FBG values increase over the planning horizon.

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

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

Funding: The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research: № 18-29-03229 и 18-29-22093.

For citation: Klimenko A. B. A Technique of the Distributed Information Systems Control Method Choice under the High Network Dynamics Conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 57-72 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-57-72).

Received 06.02.2022

Accepted 25.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

В настоящее время происходит интенсивное расширение круга информационных систем, использующих туманный и краевые слои сети для решения функциональных задач. Такая тенденция, прежде всего, связана с возрастанием объемов обрабатываемой информации, что приводит к недостаточности облачных сервисов как в смысле нагрузки на сеть при передаче данных в облако, так и в смысле латентности систем, возникающей вследствие необходимости передачи данных через многочисленные промежуточные узлы сети.

Однако туманный и краевой слои сети обладают высокой динамикой, то есть топология сети, узла, ее составляющие и связи между ними могут меняться практически непредсказуемо в зависимости от целей и задач владельцев узлов. Такая динамика внешних слоев сети приводит к множественным реконфигурациям систем, что, в свою очередь, может негативно сказываться на качестве предоставляемых сервисов (QoS), а также на загруженности устройств в случае, когда функциональные задачи должны решаться в строго отведенное для этого время [1-7].

Проблеме минимизации времени реконфигураций для информационных систем, функционирующих на краю сети, в

настоящее время посвящен достаточно широкий круг работ, например: [8-10]. Однако известные и находящиеся в открытом доступе работы рассматривают минимизацию времени на реконфигурацию с точки зрения повышения QoS. В данной статье проблема уменьшения времени реконфигурации будет рассмотрена с точки зрения остаточного ресурса вычислительных устройств.

Остаточный ресурс вычислительного устройства оценивается значением вероятности безотказной работы (ВБР) этого устройства [11]. В данной работе показано, каким образом остаточный ресурс связан с временем, отводимым для реконфигураций, и каким образом снижение временных затрат позитивно сказывается на ВБР устройства.

Целью данного исследования является подбор метода управления распределенной системой, который бы, на основании известных параметров, позволил уменьшить расход ресурсов вычислительных устройств.

Как результат исследования, в работе предложена методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры, сокращающая время детекции отказа в системе и тем самым предоставляющая дополнительное время для выполнения системой функциональных задач.

1. Материалы и методы

1.1. Реконфигурации систем в туманном и краевом слое сети и ВБР устройств

Проблема необходимости частых реконфигураций в динамических слоях сети является актуальной и рассматривается в работах [1-3]. Однако, учитывая тот факт, что не удалось обнаружить работы, в которых бы проблема была рассмотрена на примерах конкретных функционирующих систем с перечислением актуальных параметров сетевой инфраструктуры, будем рассматривать проблему для произвольной информационной системы, функционирующей в динамических слоях сети. Очевидно, что при миграции контейнеров/виртуальных машин время конфигурации в сильной степени будет зависеть от характеристик сети: чем выше скорость передачи данных, тем меньше соответственно времени потребуется на перемещение данных и на реконфигурацию в целом. Однако необходимо отметить, что край сети далеко не всегда обладает желаемыми характеристиками линий связи, что, в свою очередь, требует дополнительных мер по сокращению времени реконфигурации.

Рассмотрим выражение, позволяющее связать ВБР устройства и его загруженность [12]:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{dL/10} t}, \quad (1)$$

где λ_0 – интенсивность отказов незагруженного устройства;

L – загруженность вычислительного устройства.

Введем также понятие пользовательской операции: пользовательской операцией в контексте данной работы является процедура сбора, обработки данных и предоставления пользователю результатов. Следует отметить, что время пользовательской операции для распределенных интернет-систем может составлять часы, поскольку, например, сбор данных может осуществляться посредством краулинга интернет-источников, противодействующих ему.

Под остаточным ресурсом системы устройств, реализующих вычисления в рамках функциональных задач информационной системы будем понимать следующее:

$$\Delta P = \prod_i P_i(T_0) - \prod_i P_i(T_{op}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $P_i(T_0)$ – ВБР i -го устройства на начало пользовательской операции;

$P_i(T_{op})$ – ВБР i -го устройства на конец пользовательской операции.

Соответственно, с уменьшением значения ΔP , происходит увеличение остаточного ресурса [11,12].

Рассмотрим выражение (1). Значение ВБР на конец пользовательской операции зависит от загруженности устройства, которая, в том числе, зависит от доли времени, которая отводится для решения непосредственно функциональных задач. Реконфигурации, которые при этом происходят, уменьшают фактическое время для решения функциональных задач, поскольку реконфигурация является сама по себе вычислительной задачей, необходимость реше-

ния которой возникает в непредсказуемые моменты времени (рис.1). При этом реконфигурация также влияет на остаточный ресурс устройства.

В основе предлагаемой методики лежит следующее утверждение: умень-

шение суммарного времени реконфигураций на пользовательскую операцию позволяет таким образом распределить нагрузку с учетом дополнительного времени, что при этом снизится значение (2) (рис.2).

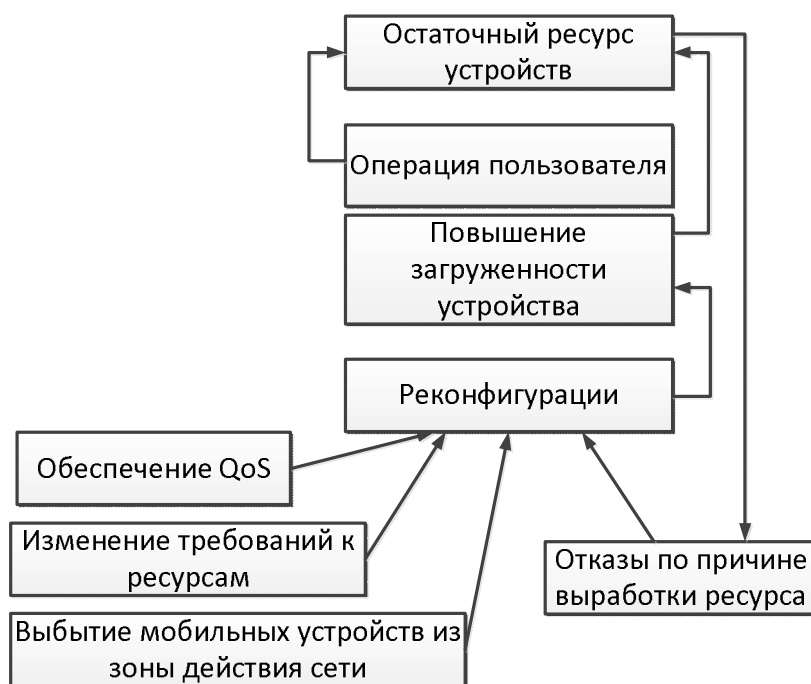


Рис. 1. Взаимное влияние параметров системы

Fig. 1. Mutual influence of system parameters

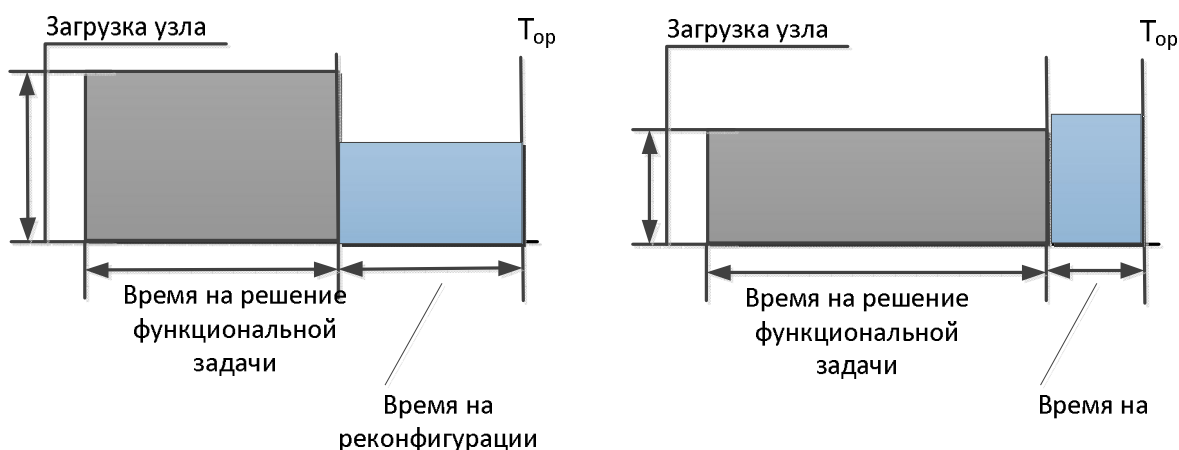


Рис. 2. Влияние времени реконфигураций на загруженность устройства

Fig. 2. The effect of reconfiguration time on device utilization

Время, требующееся на реконфигурацию, может быть уменьшено путем повышения нагрузки на вычислительное устройство, однако это приводит к ухудшению значений остаточных ресурсов устройств. По этой причине предлагается уменьшить время реконфигурации за счет применения такого метода управления элементами информационной системой, который бы для условий функционирования системы позволит сократить время реконфигурации.

В свою очередь, время реконфигурации складывается из:

- времени детекции отказа устройства (выбытия его из коллектива решающих устройств в рамках системы);
- времени формирования нового коллектива устройств.

В рамках данной работы проведено исследование зависимости времени детекции отказа для базовых методов управления системами:

- централизованного [13];
- с распределенным лидером [14-17];
- полностью децентрализованного [18-20].

На основе численного моделирования сформулирована методика выбора способа управления системой, которая позволяет уменьшить время реконфигурации и тем самым увеличить время, которое может быть потрачено на решение функциональных задач информационной системы.

1.2. Методы управления системой

Централизованное управление предполагает наличие узла, который в коллективе вычислительных устройств является лидером. Несомненным преимуществом такого подхода к организации управления является относительная простота реализации и высокое быстродействие в случае отказа одного из узлов-последователей. Однако в случае отказа лидера, система становится неуправляемой. Данная проблема решается путем введения резерва для узла-лидера, однако такой резерв требует дополнительной синхронизации данных с лидером, что ставит под вопрос целесообразность такого подхода.

Хорошей альтернативой организации отказоустойчивой системы с лидером является построение распределенного лидера. Такой подход используется во многих системах репликации данных [14-17] и описан в протоколах RAFT, ViewStamped Replication. В рамках подхода с распределенным лидером операции реализуются следующим образом: время функционирования системы разбивается на раунды (эпохи). В пределах одной эпохи функционирует один лидер, который, в случае отказа, заменяется другим. Достоинством данного метода является то, что он объединяет в себе достоинства централизованного метода (простоту реализации и скорость), но при этом обладает отказоустойчивостью, что, в свою очередь, актуально для динамичных слоев сети.

И, наконец, третий, рассмотренный здесь метод управления системой – полностью децентрализованный [18-20], при котором узлы эквиваленты и обладают унифицированным набором функций. Однако при высоких показателях надежности такой метод, во-первых, предполагает избыточность информационного обмена, во-вторых, в случае отказа узлов принимается совместное решение по поводу, какие именно узлы отказали. Это занимает дополнительное время.

Восстановление системы после отказа включает время детекции отказа и изменение конфигурации (новая привязка программных компонент к узлам). Соответственно, уменьшение времени детекции отказа, поиска и принятия новой конфигурации позволяет сократить время реконфигурации системы. Однако поиск новой конфигурации может быть оптимизирован путем выбора методов стохастического поиска, а также выбора методов распараллеливания, в то время как сокращение времени детекции отказа предлагается произвести путем выбора наиболее подходящего метода управления системой.

Приведем аналитические модели времени, необходимого для детекции отказа в рамках трех перечисленных методов управления.

При централизованном управлении детекция отказов заключается в следующем:

– необходимо зафиксировать отсутствие сигнала от подчиненного узла;

– просмотреть список узлов и объявить некоторые из них отказавшими.

Время, необходимое для детекции отказа таким способом, может быть оценено как:

$$O(D_{min}) + O(N-F) \leq t \leq O(D_{max}) + O(N-F). (3)$$

Детекция отказа с распределенным лидером складывается из следующих действий:

- фиксация отказа лидером, или
- фиксация подчиненным отказа лидера;
- установление связи с членами группы;
- выборы нового лидера;
- составление списка отказавших узлов лидером.

Время реконфигурации, соответственно, описывается выражением:

$$O(D_{min}) + O(N-F) \leq t \leq 2O(D_{max}) + 2(N-F)O(D_{max}) + O(N-F). (4)$$

Детекция отказа в системе с полностью децентрализованным управлением будет состоять из следующих шагов:

- фиксация отказа узла;
- обмен списками потенциально отказавших узлов;
- достижение консенсуса по отказавшим узлам;
- если консенсус не состоялся, повторить процедуру.

И, таким образом, оценивается как показано в выражении:

$$2O(D_{min}) + O(NF) < t < K(2O(D_{max}) + O(NF)). (5)$$

В следующем разделе будут приведены результаты моделирования, сформированные предварительные выводы по результатам и представлена методика, полученная на основе моделирования.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Результаты численного моделирования

На основе аналитических оценок проведем серию экспериментов для зависимостей времени от:

- численности группы устройств при одном отказе (рис.3,4);
- максимального диаметра сети устройств при одном отказе (рис.5,6);
- количества одновременно отказавших устройств в сети (рис.7,8).

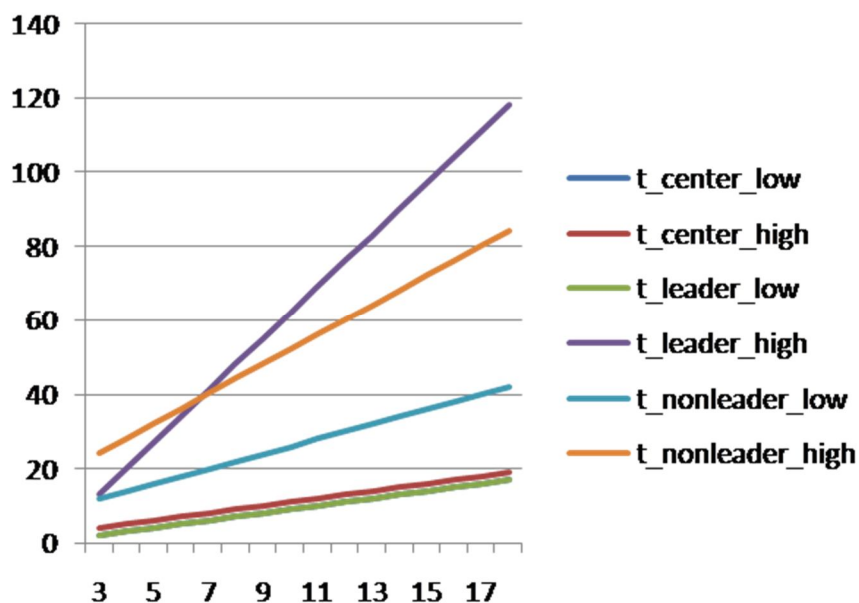


Рис. 3. Зависимость времени детекции от численности группы при диаметре сети=3

Fig. 3. The dependence of the detection time on the number of the group with the diameter of the network = 3

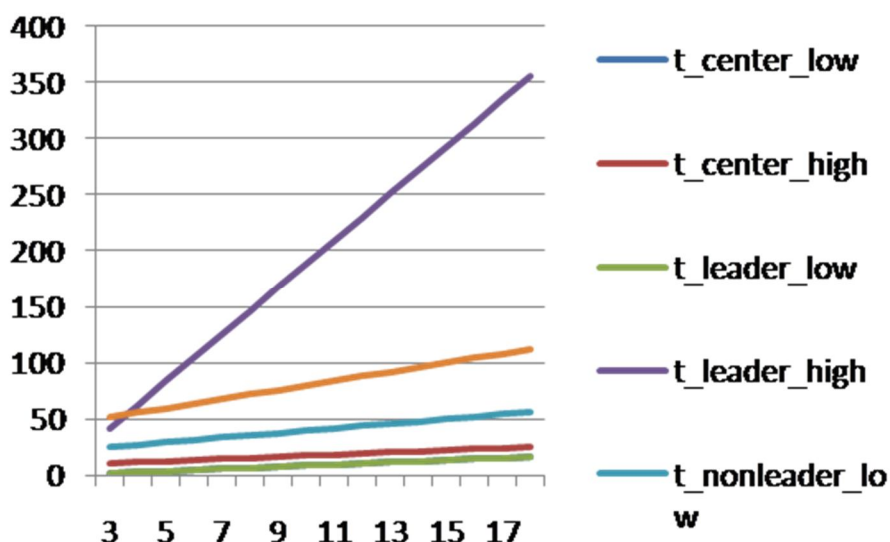


Рис. 4. Зависимость времени детекции от численности группы при диаметре сети=10

Fig. 4. The dependence of the detection time on the number of the group with a network diameter = 10

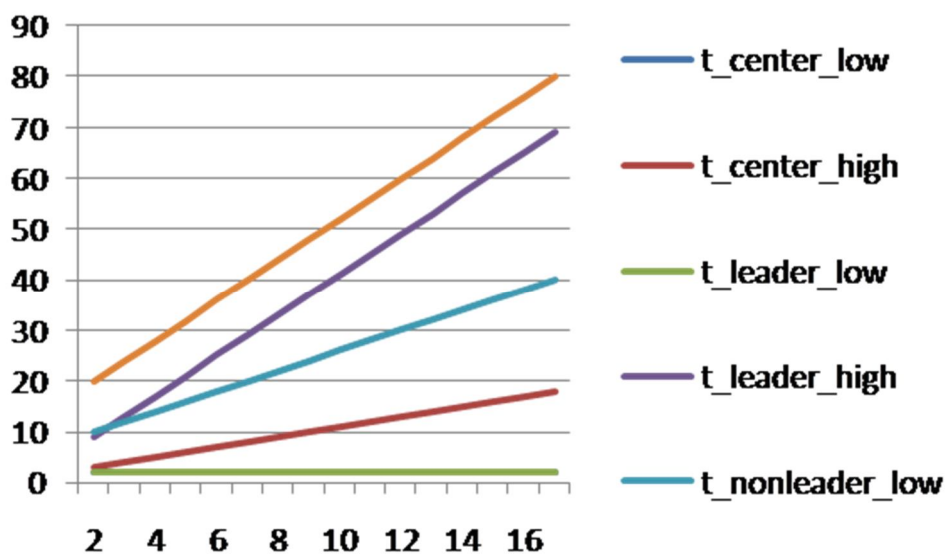


Рис. 5. Зависимость времени детекции от максимального диаметра сети при количестве устройств=3

Fig. 5. The dependence of the detection time on the maximum diameter of the network with the number of devices =3

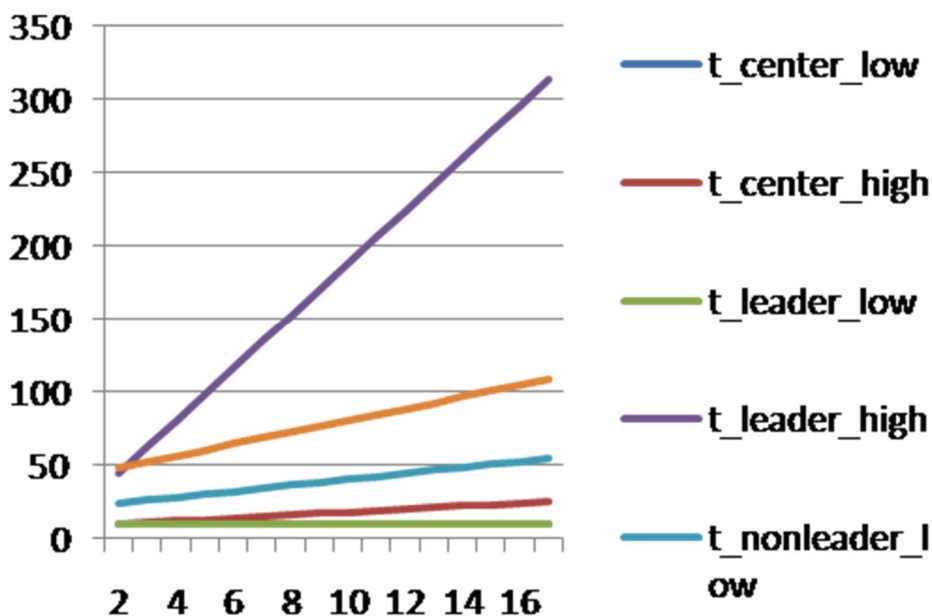


Рис. 6. Зависимость времени детекции от максимального диаметра сети при количестве устройств=10

Fig. 6. The dependence of the detection time on the maximum diameter of the network with the number of devices = 10

Наиболее весомые выводы, сделанные по результатам моделирования, следующие:

– при управлении системой на основе метода с распределенным лидером, наихудший результат получается в случае отказа лидера, но при этом, в случае отказов узлов-последователей, время детекции равно времени детек-

ции централизованного метода, что гораздо лучше, чем при полностью децентрализованном управлении;

– при отказах узлов более одного метод с распределенным лидером показывает лучший результат по причине сокращения относительного объема информации для обмена.

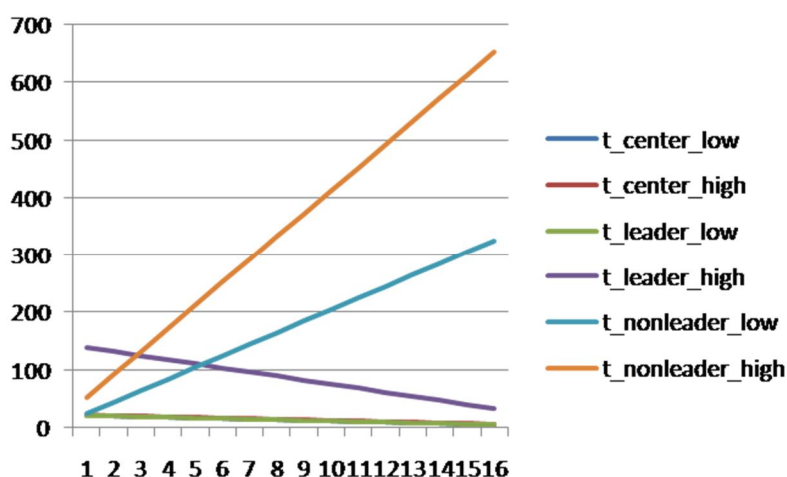


Рис. 7. Зависимость времени детекции от количества одновременно отказавших устройств при $D_{\max}=3$; $N=20$

Fig. 7. The dependence of the detection time on the number of simultaneously failed devices at $D_{\max}=3$; $N=20$

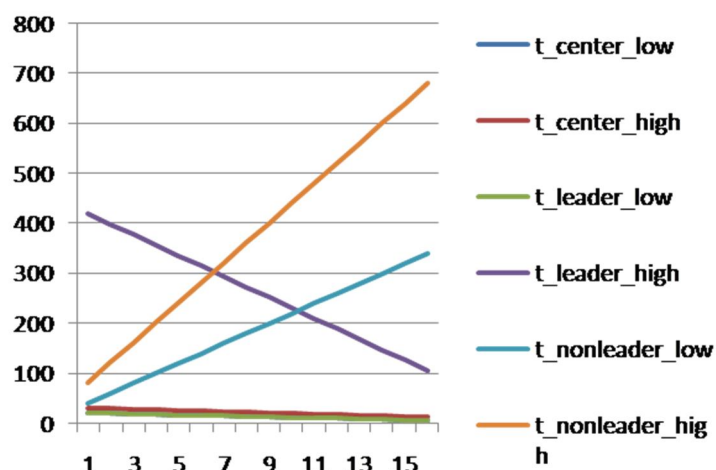


Рис. 8. Зависимость времени детекции от количества одновременно отказавших устройств при $D_{\max}=10$; $N=20$

Fig. 8. Dependence of the detection time on the number of failed devices at the same time at $D_{\max}=10$; $N=20$

Сведем результаты моделирования в таблицу 1, соотнося количественные результаты и свойства системы (параметры диаметр сети, количество узлов и их статичность).

Таким образом, на основании полученных данных может быть сформирована методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры.

Таблица 1. Применение методов управления

Table 1. Application of management methods

Сменный лидер / Replacement Leader	Децентрализованное управление / Decentralized Management
Малое количество задействованных устройств	Произвольное количество задействованных узлов
Малый диаметр сети	Произвольный диаметр сети
Высокая динамичность устройств (одновременный отказ от $\frac{1}{4}$ общей группы) при малом диаметре сети	Высокая динамичность узлов при одновременных отказах малого количества устройств
Наличие подгруппы узлов с высокими показателями статичности	Гомогенная группа по признаку статичности

2.2. Методика выбора способа управления

Основываясь на результатах моделирования, можно сделать определенные выводы о возможности выбора того или иного метода управления системой узлов, функционирующих в динамическом слое сети с целью сокращения времени реконфигурации. Последовательность действий в рамках предлагаемой методики приведена на рис. 9.

Таким образом, определяющим условием в выборе метода управления с децентрализованным лидером является наличие группы статичных узлов, на которых может функционировать распределенный лидер. Это объясняется

тем, что процедура смены лидера (а именно, пересылка контекстных данных и синхронизация узлов-последователей с лидером) является времязатратной и нивелирует все преимущества распределенного лидера по сравнению с прочими методами управления в том случае, если отказывает лидер.

Поскольку методики, ориентированные на сокращение времени реконфигурации, не рассматривают изменение ВБР устройства как целевую функцию, для оценки результата применения разработанной методики сравним значения ВБР устройства для $t=100$ ч. для различных значений доли времени, выделяемого на реконфигурацию (рис.10).

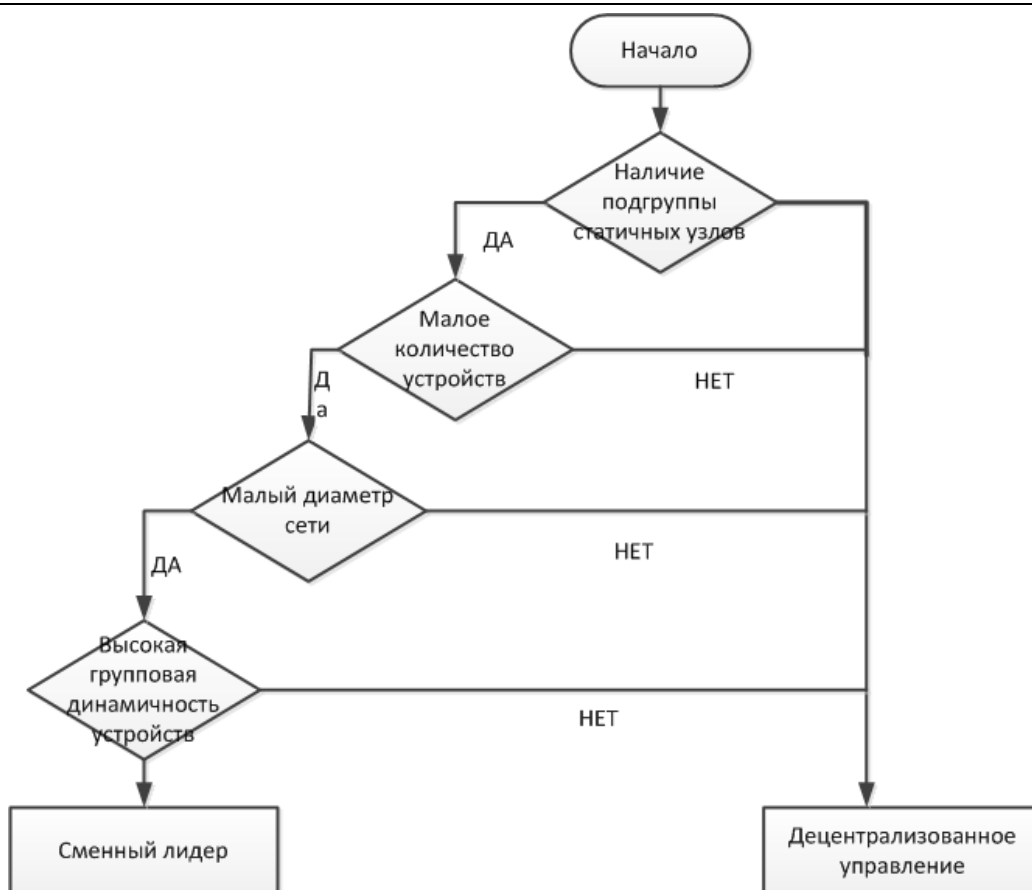


Рис. 9. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры

Fig. 9. Methodology for choosing a method for managing distributed information systems in conditions of high dynamics of network infrastructure

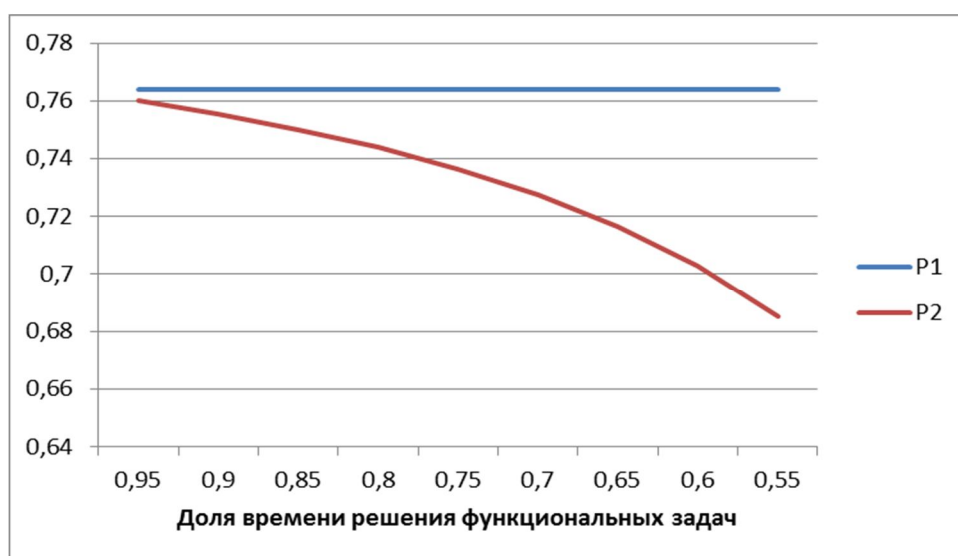


Рис. 10. Зависимость значения ВБР устройства в зависимости от доли времени пользовательской операции, используемой для решения функциональной задачи

Fig. 10. Dependence of the device's VBR value depending on the fraction of time of the user operation used to solve the functional problem

Видно, что с увеличением доли времени, тратящегося на реконфигурационные процессы, значение ВБР устройства ухудшается и достигает значимых величин (порядка 10%), когда реконфигурации начинают занимать более 55% времени пользовательской операции.

Выводы

В данной статье предложена методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры с целью уменьшения расхода ресурса вычислительных узлов, который достигается за счет со-

кращения времени реконфигурации системы и, таким образом, позволяет использовать дополнительное время для решения вычислительных задач информационных систем и тем самым снизить загруженность вычислительных узлов.

Моделирование временных затрат для различных методов управления распределенными информационными системами позволило выделить условия, при которых более целесообразно использовать метод управления с распределенным лидером, тогда как в остальных случаях целесообразно реализовать управление на основе децентрализованного метода управления.

Список литературы

1. Container Migration in the Fog / Puliafito Carlo, Vallati Carlo, Mingozzi Enzo, Merlino Giovanni, Longo Francesco, Puliafito Antonio // A Performance Evaluation. Sensors. 2019. 19. 1488. 10.3390/s19071488.
- 2.. 2017. Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter / Taleb Tarik, Dutta Sunny, Ksentini Adlen, Iqbal Muddesar, Flinck Hannu / IEEE Communications Magazine. 55. 38-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600249CM>.
3. Rejiba Zeineb, Masip Xavi, Marin-Tordera E. A Survey on Mobility-Induced Service Migration in the Fog, Edge, and Related Computing Paradigms. ACM Computing Surveys. 2019. 52. 1-33. <https://doi.org/10.1145/3326540>.
4. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. IEEE Wireless Communications Letters. 2019. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
5. Saggu Deepak, Azim Akramul. 2021. Transfer Learning on the Edge Networks. 1-8. <https://doi.org/10.1109/SysCon48628.2021.9447110>.
6. Wang Y. & Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. IEEE Wireless Communications Letters. 2019. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
7. Niu Guanchong, Cao Qi, Pun Man-on. QoS-Aware Resource Allocation for Mobile Edge Networks: User Association, Precoding and Power Allocation. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. P. 1-1. 10.1109/TVT.2021.3076353.

8. Completion Time Minimization for UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems / Xu Yu, Zhang Tiankui, Loo Jonathan, Yang Dingcheng, Xiao Lin // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3112853>.
9. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization / Ren Jinke, Yu Guanding, He Yinghui, Li Geoffrey // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. P. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2904244>.
10. Partial Offloading for Latency Minimization in Mobile-Edge Computing / Ren Jinke, Yu Guanding, Cai Yunlong, He Yinghui, Qu Fengzhong // 2017. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254550>.
11. Klimenko Anna, Kalyaev Igor. 2021. A Technique to Provide an Efficient System Recovery in the Fog- and Edge-Environments of Robotic Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_9.
12. Korovin I., Melnik E., Klimenko A. A Recovery Method for the Robotic Decentralized Control System with Performance Redundancy. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9812. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_2
13. Gardner Raymond. 2020. Centralized control systems, DCS, and SCADA. <https://doi.org/10.1201/9781003091134-17>.
14. Liskov Barbara, Cowling James. 2012. Viewstamped Replication Revisited.
15. Petrescu M., Petrescu R.. 2020. Log Replication in Raft vs Kafka. Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica. 65. 66. <https://doi.org/10.24193/subbi.2020.2.05>.
16. Oki B. Viewstamped replication for highly available distributed systems. 2021.
17. Howard Heidi, Charapko Aleksey, Mortier Richard. 2021. Fast Flexible Paxos: Relaxing Quorum Intersection for Fast Paxos. P.186-190. <https://doi.org/10.1145/3427796.3427815>.
18. Müller Jörg. 2021. Decentralized Information Systems: Paradigms, Architectures, and Applications.
19. Castro Oom, Correia Miguel. 2001. Practical Byzantine fault tolerance.
20. König Hans-Jürgen. 1994. Competitive Advantages through Flexible Design of Decentralized Information Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46955-8_72.

References

1. Puliafito Carlo, Vallati Carlo, Mingozzi Enzo, Merlino Giovanni, Longo Francesco, Puliafito Antonio. Container Migration in the Fog: A Performance Evaluation, Sensors, 2019. 1488. <https://doi.org/10.3390/s19071488>.
2. Taleb Tarik, Dutta Sunny, Ksentini Adlen, Iqbal Muddesar, Flinck Hannu. Mobile Edge Computing Potential in Making Cities Smarter. IEEE Communications Magazine. 2017, 55, 38-43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600249CM>.

3. Rejiba Zeineb, Masip Xavi, Marin-Tordera E. A Survey on Mobility-Induced Service Migration in the Fog, Edge, and Related Computing Paradigms. *ACM Computing Surveys*. 2019, 52. 1-33. <https://doi.org/10.1145/3326540>.
4. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
5. Saggu Deepak, Azim Akramul. Transfer Learning on the Edge Networks. 2021, 1-8. <https://doi.org/10.1109/SysCon48628.2021.9447110>.
6. Wang Y., Gu Yu, Tao Xiaofeng. Edge Network Slicing With Statistical QoS Provisioning. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2922605>.
7. Niu Guanchong, Cao Qi, Pun Man-on. QoS-Aware Resource Allocation for Mobile Edge Networks: User Association, Precoding and Power Allocation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3076353>.
8. Xu Yu, Zhang Tiankui, Loo Jonathan, Yang Dingcheng, Xiao Lin. Completion Time Minimization for UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3112853>.
9. Ren Jinke, Yu Guanding, He Yinghui, Li Geoffrey. Collaborative Cloud and Edge Computing for Latency Minimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019, pp. 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2904244>.
10. Ren Jinke, Yu Guanding, Cai Yunlong, He Yinghui, Qu Fengzhong. Partial Offloading for Latency Minimization in Mobile-Edge Computing. 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254550>.
11. Klimenko Anna, Kalyaev Igor. A Technique to Provide an Efficient System Recovery in the Fog- and Edge-Environments of Robotic Systems. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_9.
12. Korovin I., Melnik E., Klimenko A. A Recovery Method for the Robotic Decentralized Control System with Performance Redundancy. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2016. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9812. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_2
13. Gardner Raymond. Centralized control systems, DCS, and SCADA. 2020. <https://doi.org/10.1201/9781003091134-17>.
14. Liskov Barbara, Cowling James. Viewstamped Replication Revisited. 2012
15. Petrescu M., Petrescu R. Log Replication in Raft vs Kafka. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica*. 2020. 65. 66. <https://doi.org/10.24193/subbi.2020.2.05>.
16. Oki B. Viewstamped replication for highly available distributed systems. 2021.

17. Howard Heidi, Charapko Aleksey, Mortier Richard. Fast Flexible Paxos: Relaxing Quorum Intersection for Fast Paxos. 2021. 186-190. <https://doi.org/10.1145/3427796.3427815>.
18. Müller Jörg. Decentralized Information Systems: Paradigms, Architectures, and Applications. 2021
19. Castro Oom, Correia, Miguel. Practical Byzantine fault tolerance. 2001.
20. König Hans-Jürgen. Competitive Advantages through Flexible Design of Decentralized Information Systems. 1994. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46955-8_72.

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>