

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРА С КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИЕЙ

В. А. Богатырев^{1,2*}, В. К. Фунг¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

* vladimir.bogatyrev@gmail.com

Аннотация. Обсуждается практика развертывания приложений в виде контейнеров, получившая в последние годы широкое распространение благодаря высокой эффективности и гибкости в управлении вычислительными ресурсами. Контейнеризация позволяет ускорить разработку и развертывание программного обеспечения, повышает стабильность, производительность и надежность работы приложений при адаптивной реконфигурации системы к изменениям потоков запросов и накоплению отказов. При обосновании выбора проектных решений эффективность кластерных систем с контейнерной виртуализацией оценивается по прибыли, получаемой от эксплуатации системы в единицу времени. Эта прибыль зависит от влияния числа развертываемых контейнеров на задержки обслуживания запросов и на поддержку инфраструктуры. Трудность оценки среднего времени ожидания запросов в узлах кластера обусловлена сложным влиянием при контейнерной виртуализации динамического разделения общих вычислительных ресурсов узлов между активными контейнерами на их производительность. Цель статьи — повышение эффективности функционирования кластерных систем контейнерной виртуализации при адаптивной реконфигурации числа узлов и развернутых в них контейнеров в зависимости от интенсивности потоков запросов, поступающих в кластер. Выбор конфигурации кластера осуществляется с учетом снижения эксплуатационных расходов и повышения прибыли от своевременного и безошибочного выполнения функциональных запросов.

Ключевые слова: кластер, виртуализация, контейнер, многокритериальность, оптимизация, прибыль

Ссылка для цитирования: Богатырев В. А., Фунг В. К. Многокритериальная оптимизация структуры кластера с контейнерной виртуализацией // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 5. С. 371–379. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-5-371-379.

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF CLUSTER STRUCTURE WITH CONTAINER VIRTUALIZATION

V. A. Bogatyrev^{1,2*}, V. Q. Phung¹

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

* vladimir.bogatyrev@gmail.com

Abstract: The practice of deploying applications in the form of containers, which has become widespread in recent years due to its high efficiency and flexibility in managing computing resources is discussed. Containerization allows accelerating the development and deployment of software, increases the stability, performance and reliability of applications during adaptive reconfiguration of the system to changes in request flows and accumulation of failures. When substantiating the choice of design solutions, the efficiency of cluster systems with container virtualization is estimated by the profit received from operating the system per unit of time. This profit depends on the impact of the number of deployed containers on request servicing delays and on infrastructure support. The difficulty of estimating the average wait time for requests in the cluster nodes is due to the complex effect of dynamic sharing of shared computing resources of nodes between active containers on their performance during container virtualization. The study is aimed

at improving the efficiency of cluster container virtualization systems with adaptive reconfiguration of the number of nodes and containers deployed in them depending on the intensity of requests coming into the cluster. The choice of cluster configuration is made taking into account the reduction of operating costs and increase in profit from the timely and error-free execution of functional requests.

Keywords: cluster, virtualization, container, multi-criteria, optimization, profit

For citation: Bogatyrev V.A., Phung Van Quy. Multi-Criteria Optimization of Cluster Structure with Container Virtualization. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 5. P. 371–379 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-5-371-379.

Введение. В условиях стремительного развития информационных технологий виртуализация и контейнеризация приложений стали основными технологиями, позволяющими оптимизировать производительность и снизить затраты на управление ИТ-инфраструктурой [1–7]. Технология виртуализации при консолидации ресурсов обработки и хранения данных в системах кластерной архитектуры позволяет запускать несколько виртуальных машин на одном физическом оборудовании, что способствует адаптивной оптимизации использования ресурсов в целях максимизации качества выполнения необходимых функций и снижения эксплуатационных издержек [8–10].

Принципы построения, модели и задачи оптимизации кластерных систем, включая виртуализацию и контейнеризацию, рассматривались в работах [11–15]. Для эффективного управления виртуальными машинами и контейнерами разработано множество инструментов, таких как VMware, Hyper-V, Docker, Kubernetes и OpenShift. Эти инструменты поддерживают процессы развертывания, мониторинга и управления вычислениями в кластере.

Техническая и экономическая эффективность кластерных систем характеризуется множеством частных критериев, таких как задержки обслуживания запросов, пропускная способность, коэффициенты готовности и оперативной готовности, затраты на сторонние системы, эксплуатационные расходы, включая электропотребление, техническое обслуживание и восстановление после отказов. Для информационно-коммуникационных систем множество частных показателей оценивается с учетом сетей связи [16–19], а также систем хранения и обработки данных. Векторная оптимизация по совокупности частных критериев в области Парето-эффективных решений достигается на основе скалярных аддитивных или мультипликативных критериев, применение которых затруднено из-за субъективности в определении их значимости, обычно основанной на экспертных оценках. Лучшие результаты оптимизации удастся получить при формировании обобщающих критериев, физический смысл которых понятен и отражает особенности рассматриваемых систем. Так, в [20] для кластерных систем предложен комплексный показатель, отражающий вероятности того, что в определенный момент времени система находится в работоспособном состоянии и запросы будут выполнены безошибочно за время, меньшее предельно допустимой задержки.

Сложность формирования обобщенного критерия эффективности систем обусловливается зависимостью различных частных показателей эффективности, которая может быть установлена с учетом экономических затрат на увеличение этих показателей. При таком подходе эффективность процедур технического обслуживания и организации вычислительных процессов может быть оценена по прибыли от реализации вычислений, получаемой за единицу времени с учетом амортизации, энергопотребления, затрат на восстановление отказавших узлов и штрафов за несвоевременное обслуживание запросов [21–23].

Цель настоящей статьи — повышение эффективности функционирования кластерных систем. Повышение экономической и технической эффективности кластера достигается при обосновании выбора структуры кластерной системы с контейнерной виртуализацией с учетом влияния на ее производительность распределения общих ресурсов между активными контейнерами, т. е. контейнерами, задействованными в выполнении функциональных запросов, и общим числом развернутых в узлах кластера контейнеров. Выбор конфигурации кластера осуществля-

ется с учетом снижения эксплуатационных расходов и повышения прибыли от своевременного и безошибочного выполнения функциональных запросов.

Конфигурация кластерной системы. Исследуется кластерная компьютерная система, структура которой представлена на рис. 1. Система объединяет N компьютерных узлов, на каждом из которых развернуто n контейнеров. Равномерное распределение входного потока, поступающего в систему с интенсивностью $\lambda_{\text{вх}}$, обеспечивается балансировщиком. Трудность оценки задержек обслуживания функциональных запросов исследуемых систем обусловлена сложным влиянием динамического разделения общих вычислительных ресурсов узлов между активными контейнерами на интенсивность обслуживания запросов. Особенностью разделения ресурсов в системах контейнерной виртуализации является их предоставление каждому активному контейнеру только во время непосредственного использования для выполнения запросов и поддержки функционирования всех развернутых в узлах средств. Влияние этих факторов на интенсивность обслуживания запросов в контейнерах установлена в соответствии с методикой, описанной в [24], на стенде кластера, развернутого на основе средств Kubernetes k3s.

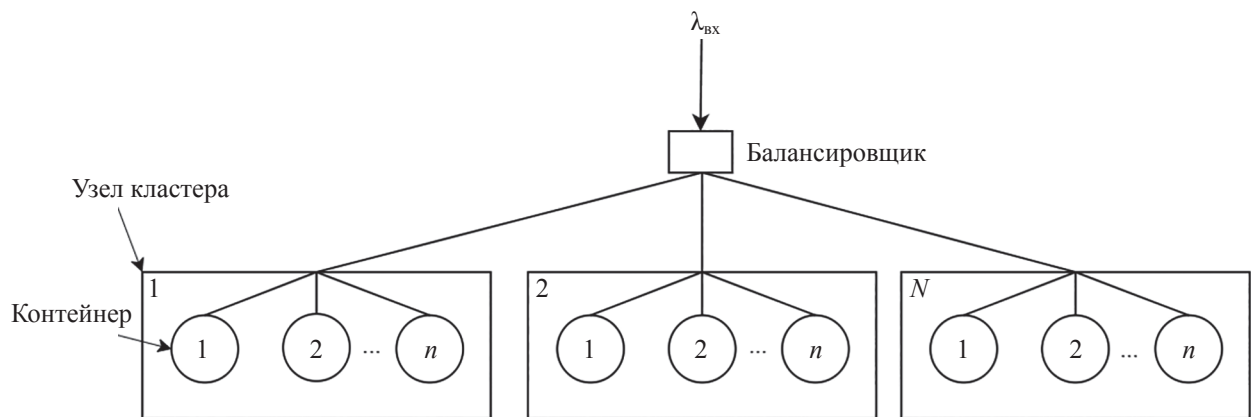


Рис. 1

Результаты экспериментов представлены матрицей (рис. 2), элемент μ_{ij} которой соответствует интенсивности обслуживания в активном контейнере, когда общее число развернутых в узлах кластера контейнеров i , а число активных контейнеров j .

20.2939	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2939	12.8345	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2939	12.8145	10.5976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2939	12.7945	10.5976	8.53159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2383	12.7345	10.1571	8.09106	7.04374	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.238	12.1577	9.4802	8.0910	7.0437	5.8002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2388	12.0798	8.4364	7.0698	6.1017	5.6349	5.2609	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2388	10.8444	8.4364	7.0698	6.1017	5.63497	5.2609	4.74564	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2134	10.7351	7.9526	6.5623	5.6782	5.19006	4.8508	4.5493	4.3592	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.2134	10.7351	7.9526	6.5624	5.6782	5.1900	4.8508	4.5493	4.3592	4.1393	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.1786	10.7351	7.907	6.3598	5.4465	4.8485	4.4857	4.1842	3.9942	3.7742	3.5329	0	0	0	0	0	0	0	0
20.1786	10.7351	7.9071	6.3598	5.4465	4.8485	4.4857	4.1842	3.9942	3.7742	3.5329	3.3265	0	0	0	0	0	0	0
20.1178	10.7276	7.6373	6.1359	5.2226	4.7261	4.3633	4.0333	3.7794	3.5466	3.3053	3.0989	3.0290	0	0	0	0	0	0
20.1178	10.7276	7.6373	6.1359	5.2226	4.7261	4.3633	4.0333	3.7794	3.5466	3.3053	3.0989	3.0290	2.9175	0	0	0	0	0
20.1178	10.6163	7.4287	5.9500	4.9923	4.4672	4.0903	3.7603	3.5654	3.3326	3.1654	2.9590	2.8891	2.7776	2.7087	0	0	0	0
20.1178	10.6163	7.4287	5.9500	4.9923	4.4672	4.0903	3.7603	3.5654	3.3326	3.1654	2.9590	2.8891	2.7776	2.7087	2.5852	0	0	0
20.1155	10.6140	7.3999	5.7601	4.8081	4.2830	3.8950	3.5650	3.3598	3.1253	3.0164	2.8100	2.7170	2.6055	2.5421	2.4186	2.3940	0	0
19.9868	10.3326	7.3938	5.7601	4.8081	4.2830	3.8950	3.5650	3.3598	3.1253	3.0164	2.8100	2.7170	2.6055	2.5421	2.4186	2.3940	2.3226	0
19.9868	10.3326	7.3938	5.6515	4.6996	4.1745	3.7864	3.4564	3.2388	3.004	2.8845	2.7414	2.6484	2.5369	2.4395	2.3160	2.2913	2.270	2.1925
19.9868	10.3326	7.3938	5.6515	4.6996	4.1745	3.7864	3.4564	3.2388	3.004	2.8845	2.7414	2.6484	2.5369	2.4395	2.3160	2.2913	2.270	2.1925

Рис. 2

Результаты эксперимента показаны на рис. 3. Как видно из графика, при одинаковом числе активных контейнеров чем меньше общее количество развернутых контейнеров, тем быстрее каждый контейнер обрабатывает запросы. Это объясняется тем, что ресурсы системы распределяются между всеми контейнерами.

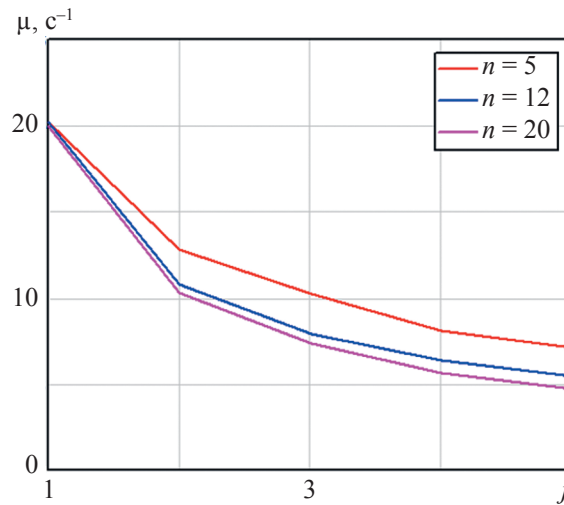


Рис. 3

По результатам экспериментов, представленных матрицей μ_{ij} в [25], установлена зависимость среднего времени ожидания запросов (T) от числа развернутых контейнеров. Эта зависимость представлена на рис. 4, где также приведены результаты имитационного моделирования для определения искомого времени.

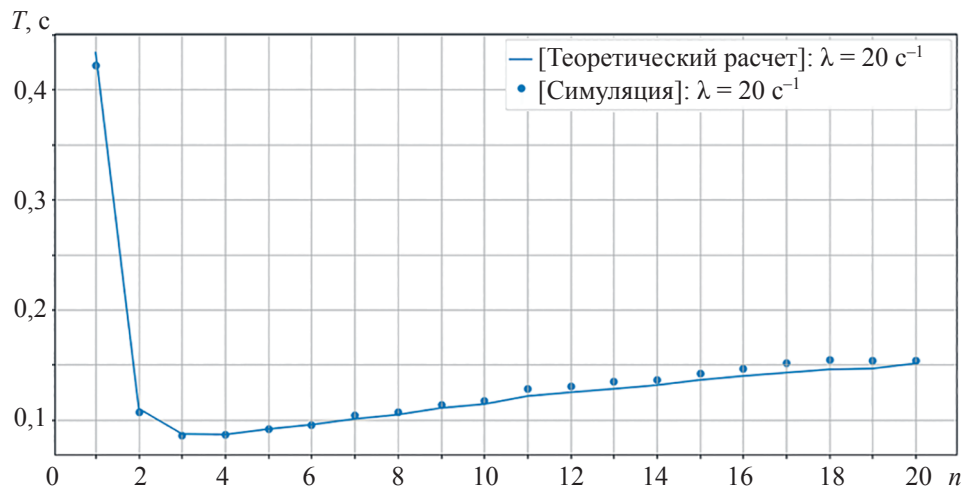


Рис. 4

Оценка прибыли от предоставления информационных услуг и оптимизация структуры кластера. При оценке прибыли от обслуживания запросов будем считать заданными следующие параметры:

C_0 — прибыль, получаемая за каждый обработанный запрос;

C_1 — штраф за каждый запрос, превышающий допустимое время обработки (определяется как доля отклонения от допустимого значения);

Q — затраты на поддержание одного сервера (виртуальной машины) за единицу времени;

$T_{\text{доп}}$ — допустимое время пребывания запроса в системе, при превышении которого накладывается штраф;

N — количество серверов (виртуальных машин) в кластере, где $N \leq 50$ (ограничение связано с доступными ресурсами компании);

n — количество контейнеров, разворачиваемых в каждом узле кластера (сервере).

Прибыль в единицу времени вычисляется по следующей формуле:

$$S = \begin{cases} \lambda C_0 - QN, & \text{если } T \leq T_{\text{доп}}, \\ \lambda C_0 - QN - \lambda C_1 \frac{T - T_{\text{доп}}}{T_{\text{доп}}}, & \text{если } T > T_{\text{доп}}. \end{cases}$$

Зависимость прибыли S от изменения параметров N и n при $C_0 = 0,16$ у. е., $C_1 = 0,04$ у. е., $Q = 0,05$ у. е. и $T_{\text{доп}} = 0,05$ с представлена на рис. 5, а, б соответственно.

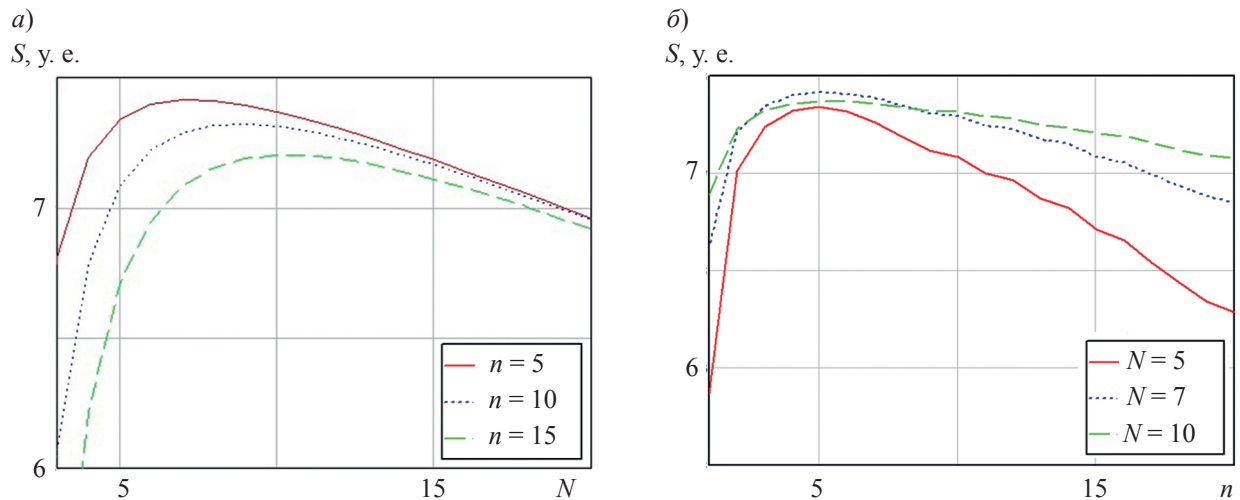


Рис. 5

Как видно из графиков, с увеличением количества серверов (N) и контейнеров (n) прибыль за единицу времени сначала возрастает, а затем снижается. Это происходит потому, что при увеличении числа контейнеров сначала уменьшается среднее время обработки запросов, что позволяет системе обрабатывать большее количество запросов. Однако если число контейнеров превышает определенное значение, начинает проявляться эффект увеличения задержки, вызванный перераспределением ресурсов. При увеличении числа серверов удается снизить задержки обслуживания запросов, однако существует граница, при которой затраты на эксплуатацию серверов негативно сказываются на общей прибыли системы. Таким образом, возникает необходимость решения задачи оптимизации структуры кластера, включающей определение количества разворачиваемых контейнеров на узлах кластера и числа узлов в кластере.

Прибыль, получаемая в единицу времени, зависит от интенсивности поступления запросов при фиксированных N и n , эта зависимость представлена на рис. 6.

На рис. 6 видно, что с увеличением интенсивности запросов прибыль за единицу времени возрастает до определенного значения, после чего начинает снижаться, так как при высокой интенсивности запросов увеличивается задержка их обработки, что приводит к снижению эффективности системы.

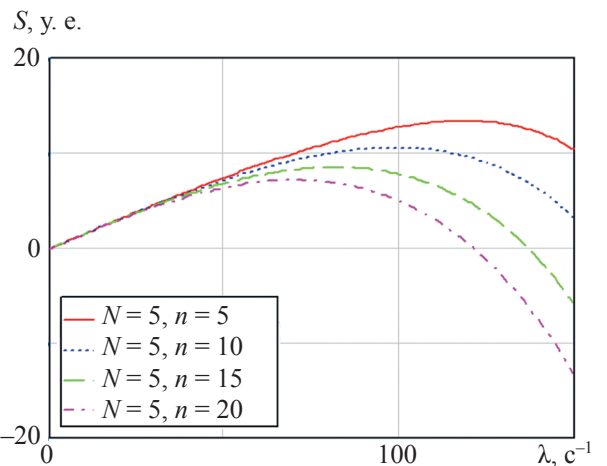


Рис. 6

Таким образом, возникает задача оптимизации, заключающаяся в определении оптимального количества серверов (N_{opt}) и контейнеров (n_{opt}) для максимизации прибыли. Решение этой задачи возможно с использованием разработанной в Mathcad 15 программы, как показано на рис. 7.

```

find_N_n_for_max_S( $\lambda$ ) :=
  N_opt  $\leftarrow$  1
  n_opt  $\leftarrow$  1
  S_max  $\leftarrow$   $-10^5$ 
  for Ni  $\in$  1..N_max
    for ni  $\in$  1..n_max
      if S(Ni, ni,  $\lambda$ ) > S_max    if  $\left( \frac{\lambda}{\text{max\_available\_}\lambda(\text{Ni}, \text{ni})} < 1 \right)$ 
        N_opt  $\leftarrow$  Ni
        n_opt  $\leftarrow$  ni
        S_max  $\leftarrow$  Ss(Ni, ni,  $\lambda$ )
  return  $\begin{pmatrix} S_{\text{max}} \\ N_{\text{opt}} \\ n_{\text{opt}} \end{pmatrix}$ 

```

Рис. 7

Условие стационарности определяется как формула, согласно которой нагрузка должна быть меньше единицы. Эта формула позволяет найти предельную интенсивность, при которой условия стационарности не выполняются:

$$\lambda < \max_{a \in [1; n], b \in [1; N]} \lambda(N, n) = nN \max(\mu(a, b)).$$

Результат, возвращаемый данной программой, представляет собой массив, который содержит следующие данные: максимальную прибыль при оптимальных значениях N_{opt} , n_{opt} , а также сами значения N_{opt} и n_{opt} . Этот массив позволяет оценить эффективность системы при различных конфигурациях и выбрать наилучшие параметры для максимизации прибыли.

На рис. 8, а, б представлен результат определения оптимальных значений N_{opt} и n_{opt} в зависимости от изменения интенсивности запросов. Видно, что при очень высокой интенсивности запросов максимальная прибыль достигается только при максимальном количестве серверов, соответствующем средствам, выделяемым на построение кластера. Однако при этом оптимальное количество контейнеров составляет всего $n = 5$, поскольку увеличение числа контейнеров приводит к росту задержки в обслуживании запросов.

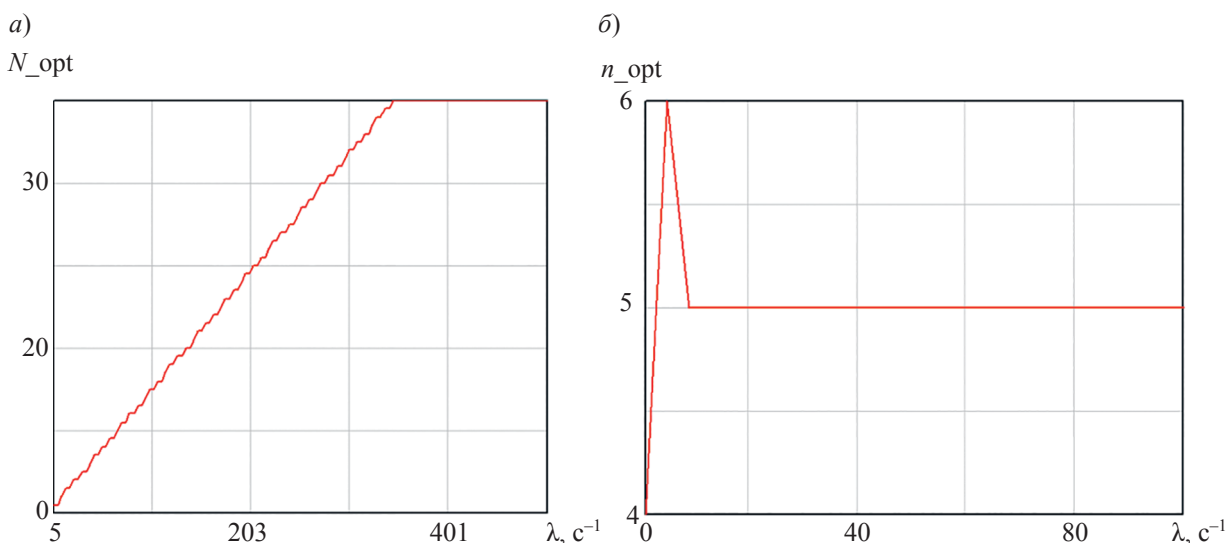


Рис. 8

Представленная программа позволяет определить возможную максимальную прибыль за единицу времени при заданной интенсивности запросов с учетом ограничений средств на построение кластера. Результаты представлены на рис. 9.

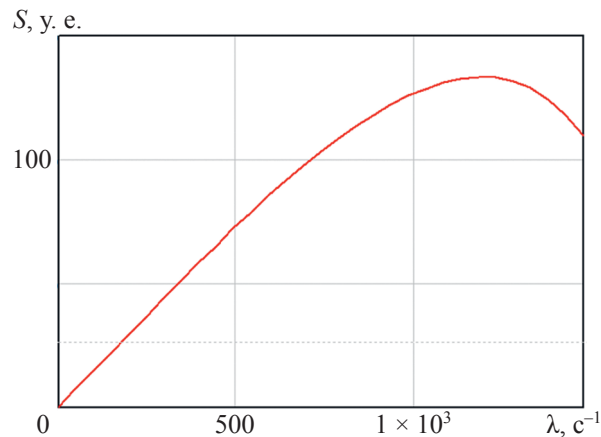


Рис. 9

Таким образом, для каждого значения интенсивности запросов можно определить максимальную возможную прибыль, регулируя количество серверов N и контейнеров n .

Заключение. Для вычислительного кластера с контейнерной виртуализацией проанализировано влияние выбора количества серверов и развернутых контейнеров на экономическую эффективность обслуживания запросов. Показано, что при увеличении числа серверов в условиях высокой интенсивности запросов прибыль сначала растет благодаря повышению способности системы обрабатывать запросы в допустимые сроки. Однако по мере дальнейшего увеличения числа серверов прибыль снижается из-за роста затрат на их поддержку. Аналогичным образом, прибыль увеличивается до определенного момента при росте числа контейнеров на каждом сервере, но дальнейшее увеличение количества контейнеров приводит к снижению прибыли. Это происходит из-за разделения вычислительных ресурсов узла между контейнерами, что увеличивает задержку обслуживания запросов и влечет за собой штрафы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koren H. Fault Tolerant Systems. San Francisco: Morgan Kaufmann Publ., 2009. P. 309.
2. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
3. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб: Питер, 2005. 479 с.
4. Aysan H. Fault-tolerance strategies and probabilistic guarantees for real-time systems Mälardalen University: Extended abstract of Doctor's Thesis. Västerås, Sweden, Mälardalen Univ. 2012.
5. Shubinsky I. B., Rozenberg I. N., Papic L. Adaptive fault tolerance in real-time information systems // Reliability: Theory & Applications. 2017. Vol. 12, N 1(44). P. 18–25.
6. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
7. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с.
8. Sanjay H., Ahirwar P., Rajan S. Containerization: cloud computing based inspiration Technology for Adoption through Docker and Kubernetes // 2nd Intern. Conf. on Electronics and Sustainable Communication Systems. 2021. DOI: 10.1109/ICESC51422.2021.9532917.
9. Hanan S. et al. Cloud computing virtualization of resources allocation for distributed systems // Journal of Applied Science and Technology Trends. 2020. Vol. 1. N 2. P. 98–105. DOI: 10.38094/jastt1331.
10. Ouafa B., Belloum A. S. Z., Sebaa A., El-Maouhab A. Containerization technologies: Taxonomies, applications and challenges // Journal of Supercomputing. 2022. Vol. 78, N 1. P. 1144–1181. DOI: 10.1007/s11227-021-03914-1.
11. Kim S., Choi Y. Constraint-aware VM placement in heterogeneous computing clusters // Cluster Computing. 2020. Vol. 23. P. 71–85. DOI: 10.1007/s10586-019-02966-6.

12. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Надежность функционирования кластерных систем реального времени с фрагментацией и резервированным обслуживанием запросов // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 6. С. 409–416.
13. Татарникова Т. М., Архипцев Е. Д., Кармановский Н. С. Определение размера кластера и числа реплик высоконагруженных информационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 646–651.
14. Богатырев В. А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей // Информационные технологии. 2006. № 9. С. 25–30.
15. Богатырев В. А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18.
16. Пастушок И. А., Тюрликов А. М. Анализ скорости алгоритма случайного доступа с разной длительностью слотов на основе алгоритма АЛОХА // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 759–766. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-759-766.
17. Астахова Т. Н., Верзун Н. А., Колбанев М. О., Полянская Н. А., Шамин А. А. Вероятностно-энергетические характеристики взаимодействия умных вещей // Вестн. НГИЭИ. 2019. № 4 (95). С. 66–77.
18. Zakoldaev D. A., Korobeynikov A. G., Shukalov A. V., Zharinov I. O. Workstations Industry 4.0 for instrument manufacturing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 665. P. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/665/1/012015.
19. Астахова Т. Н., Колбанёв М. О., Лямин А. С., Маслов Н. С., Маслова Д. А. Энергоэффективный алгоритм выбора маршрута передачи данных в беспроводных сенсорных сетях высокой плотности // Тр. учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 4. С. 100–109.
20. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 608–617. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617.
21. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Recovery of Real-Time Clusters with the Division of Computing Resources into the Execution of Functional Queries and the Restoration of Data Generated Since the Last Backup // Lecture Notes in Computer Science. 2024. Vol. 14123. P. 236–250. DOI: 10.1007/978-3-031-50482-2_19.
22. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Multipath Transmission of Heterogeneous Traffic in Acceptable Delays with Packet Replication and Destruction of Expired Replicas in the Nodes that Make Up the Path // Communications in Computer and Information Science. 2023. Vol. 1748. P. 104–121. DOI: 10.1007/978-3-031-30648-8_9.
23. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Choosing the Discipline of Restoring Computer Systems with Acceptable Degradation with Consolidation of Node Resources Saved After Failures // Intern. Conf. on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.997660.
24. Фунг В. К., Богатырев В. А. Экспериментальное исследование производительности кластера с контейнерной виртуализацией // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67. № 8. С. 647–656.
25. Фунг В. К., Богатырев В. А., Кармановский Н. С., Лэ В. Х. Оценка вероятностно-временных характеристик компьютерной системы с контейнерной виртуализацией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 249–255. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Анатольевич Богатырев

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационной безопасности; E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com

Фунг Ван Кю

— аспирант; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: phungvanquy97@gmail.com

Поступила в редакцию 13.05.24; одобрена после рецензирования 12.07.24; принята к публикации 27.02.25.

REFERENCES

1. Koren H. *Fault tolerant systems*, San Francisco, Morgan Kaufmann publications, 2009, 309 p.
2. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of Reliability Theory), St. Petersburg, 2006, 702 p. (in Russ.)

3. Cherkosov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* (Reliability of Hardware and Software Systems), St. Petersburg, 2005, 479 p. (in Russ.)
4. Aysan H. *Fault-tolerance strategies and probabilistic guarantees for real-time systems*, Doctor's thesis, Mälardalen University, 2012, 109 p.
5. Shubinsky I.B., Rozenberg I.N., Papic L. *Reliability: Theory & Applications*, 2017, no. 1(12), pp. 18–25.
6. Kleinrock L. *Queueing Systems*, NY, Wiley Interscience, 1975–1976.
7. Kleinrock L. *Queueing Systems*, Vol. II – Computer Applications, NY, Wiley Interscience, 1976, 576 p.
8. Hardikar S., Pradeep A., and Sameer R. *2021 2nd Intern. Conf. on Electronics and Sustainable Communication Systems*, 2021, DOI: 10.1109/ICESC51422.2021.9532917.
9. Shukur H. et al. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2020, no. 2(1), pp. 98–105, DOI: 10.38094/jastt1331.
10. Bentaleb O., Belloum A.S.Z., Sebaa A., and El-Maouhab A. *The Journal of Supercomputing*, 2022, no. 1(78), pp. 1144–1181, DOI: 10.1007/s11227-021-03914-1.
11. Kim S., Choi Y. *Cluster Computing*, 2020, vol. 23, pp. 71–85, DOI: 10.1007/s10586-019-02966-6.
12. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. *Information Technologies*, 2016, no. 6(22), pp. 409–416. (in Russ.)
13. Tatarnikova T.M., Arkhiptsev E.D., Karmanovskiy N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 8(66), pp. 646–651. (in Russ.)
14. Bogatyrev V.A. *Information Technologies*, 2006, no. 9, pp. 25–30. (in Russ.)
15. Bogatyrev V.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 10, pp. 18. (in Russ.)
16. Pastushok I.A., Turlikov A.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 9(67), pp. 759–766, DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-759-766. (in Russ.)
17. Astakhova T.N., Verzun N.A., Kolbanyov M.O., Polyanskaya N.A., Shamin A.A. *Bulletin NGIEI*, 2019, no. 4(95), pp. 66–77. (in Russ.)
18. Zakoldaev D.A., Korobeynikov A.G., Shukalov A.V., Zharinov I.O. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 665, pp. 012015, DOI: 10.1088/1757-899X/665/1/012015.
19. Astakhova T.N., Kolbanev M.O., Lyamin A.S., Maslov N.S., Maslova D.A. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2024, no. 4(10), pp. 100–109. (in Russ.)
20. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, no. 3(23), pp. 608–617. (in Russ.)
21. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2024, vol. 14123, pp. 236–250, DOI: 10.1007/978-3-031-50482-2_19.
22. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748, pp. 104–121, DOI: 10.1007/978-3-031-30648-8_9.
23. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *2022 Intern. Conf. on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–4, DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.997660.
24. Quy Phung Van, Bogatyrev V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 8(67), pp. 647–656. (in Russ.)
25. Phung Van Quy, Bogatyrev V.A., Karmanovskiy N.S., Le V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, no. 2(24), pp. 249–255, DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Vladimir A. Bogatyrev

— Dr. Sci, Professor; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Security; E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com

Phung Van Quy

— Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: phungvanquy97@gmail.com

Received 13.05.24; approved after reviewing 12.07.24; accepted for publication 27.02.25.