

# Оптимизация периодичности тестирования памяти вычислительных систем

К.И. Тахаутдинова, В.А. Богатырев

**Аннотация** — Одна из эффективных мер повышения готовности к безошибочному отказоустойчивому функционированию компьютерных систем является их — периодический тестовый контроль, совмещенный с оперативным контролем. При этом возникает задача разрешения технического противоречия, вызванного тем, что увеличение частоты активизации тестирования приводит к увеличению простоев, а снижение к увеличению вероятности опасных состояний функционирования в условиях необнаруженных отказов. В работе предложен подход для поиска оптимальной частоты тестирования на основе марковских моделей для систем с выделением вычислительного узла и узла памяти.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения модели для повышения коэффициента готовности системы к безошибочному функционированию при снижении простоев во время тестирования.

**Ключевые слова** — оперативный контроль, тестовый контроль, марковская модель, коэффициент готовности к безошибочному функционированию, оптимизация, периодичность тестирования.

## I. ВВЕДЕНИЕ

К современным системам обработки информации в том числе на основе кластерной архитектуры предъявляются ключевым является повышение доступности и готовности к безошибочному выполнению функциональных задач. [1-3]. Высокая доступность распределенных компьютерных систем должна поддерживаться как на уровне сети [4,5], так и на уровне систем обработки и хранения данных [6,7]. Высокая отказоустойчивость, надёжность и достоверность функционирования компьютерных систем во многом зависит от организации восстановления, диагностики при сочетании оперативного и тестового контроля функционирования системы [4-9].

Эффективность контроля во много связана с разрешением противоречия периодичности инициализации интервалов тестирования, так как слишком частые проверки приводят к неоправданным затратам и к непроизводительным простоям, а слишком редкие — увеличивают риск длительного пребывания системы в состоянии с невыявленными отказами, наличие которых связана с рисками выдачи ошибочных результатов, что для систем ответственного назначения является

неприемлемым. Разрешение данного противоречия предлагается на основе марковской модели, позволяющей найти интервал между инициализациями контроля, который максимизирует коэффициент готовности системы к безошибочному функционированию [9-15].

Известны марковские кластерных резервированных систем, ориентированные на анализ задержек и устойчивость функционирования в кластере, за частую не отражают влияние контроля на надёжность и производительность системы [16-17].

Влияние периодичности системы тестового контроля на достоверность и готовность системы без резервирования и дублированной компьютерной системы из идентичных вычислительных узлов без детализации их структуры исследовано в работах [18, 19]. Исследование по [18, 19] опирается на аппарат марковских моделей. В [18] рассмотрено функционирование системы, при котором одновременное тестирование обоих узлов исключается чтобы снизить вероятность простоя всей системы из-за тестирования, что важно для систем с высокими требованиями к бесперебойному устойчивому выполнению требуемых функций при минимизации простоев. При этом в [18, 19] установлена оптимальная частота активизации режима тестирования. Работа [18] позволяет учесть особенности тестового контроля для обнаружения как отказов, так и деструктивных воздействий, направленных на нарушения нормального функционирования системы

Вопросы совмещения оперативного контроля и периодически активируемых режимов тестового контроля и контроля на основе дублированных вычислений при сравнении результатов в контрольных точках проработаны в статье [20]. Работа позволяет на основе марковской модели определить оптимальную периодичность активации указанных режимов работы. В режиме дублированных вычислений при несовпадении результатов в контрольной точке проводится повтор вычислений с момента предыдущего сравнения с совпадением результатов. Если при повторном вычислении результаты совпадают, то идентифицируется сбой и вычислительный процесс продолжается. При повторном несовпадении результатов делается вывод о наличии отказа в одном или двух устройствах и иницируется тестовый контроль этих устройств. Такой подход предположительно является эффективным и менее затратным по сравнению с комбинацией только оперативного и тестового контроля.

Статья получена 30.12.2025.

К.И. Тахаутдинова, Университет ИТМО (e-mail: karina.takhautdinova@mail.ru).

В.А. Богатырев, Университет ИТМО (e-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com).



$$b = e^{[-(1-d)\frac{\lambda_2}{\mu_t}]}$$

Интенсивность перехода при завершении тестирования в исходное состояние вычислим как  $\mu_t b$ . Если отказы во время тестирования возникают, и они обнаружены, то происходит переход в состояние «10» с интенсивностью  $a(1-b)\mu_t + d\lambda_2$ , при этом  $a$  вероятность возникновения отказа во время тестирования, когда проверка соответствующей области памяти уже выполнена. Если возникающие во время тестирования отказы памяти не обнаружены, то осуществляется переход в состояние «1S» с интенсивностью  $(1-a)(1-b)\mu_t$ .

При инициализации тестирования памяти в состоянии «1S» интенсивность перехода в состояние «10» равна  $\mu_t + d\lambda_2$ .

Во время тестирования системы в состоянии «T1S» могут происходить отказы процессора, это соответствует переходу в состояние, которое обозначено «T0S». После восстановления вычислительного узла система возвращается в состояние «T1S».

Стоит задача оптимизации: на сколько часто необходимо переходить в режим тестирования.

По диаграмме состояний и переходов на рис 1 на основе известных правил составляется система алгебраических уравнений Колмогорова:

$$\begin{aligned} P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 &= 1, \\ -\mu_1 P_1 + \lambda_1 P_0 &= 0, \\ -[\lambda_t + \lambda_1 + (1-d)\lambda_2 + d\lambda_2]P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_8 + \mu_t b P_6 &= 0, \\ -\mu_1 P_3 + \lambda_1 P_2 &= 0, \\ -[\lambda_t + \mu_t + d\lambda_2]P_4 + \mu_1 P_5 + \lambda_t P_2 &= 0, \\ -\mu_1 P_5 + \lambda_1 P_4 &= 0, \\ -[\lambda_t + \lambda_1 + d\lambda_2]P_2 + \mu_1 P_3 + (1-b)(1-a)\mu_t P_6 + (1-d)\lambda_2 P_0 &= 0, \\ -\mu_1 P_7 + \lambda_1 P_6 &= 0, \\ -[\lambda_1 + a(1-b)\mu_t + d\lambda_2 + (1-b)(1-a)\mu_t + \mu_t b]P_6 + \mu_1 P_7 + \lambda_t P_0 &= 0. \end{aligned}$$

Определив по данной системе алгебраических уравнений вероятности всех состояний вычислительной системы, установим зависимость коэффициента готовности функциональных задач от  $\lambda_t$ . Результаты расчета представлены на рис.2. Вычисления выполнены при  $\lambda_1 = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ;  $\lambda_2 = 10^{-3}$ ;  $\mu_1 = 1 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\mu_2 = 0,5 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\mu_t = 0,1 \text{ ч}^{-1}$ ;  $a = 0,5$ .

На рисунке 2 представлено семейство кривых с изменением доли отказов памяти, обнаруживаемых при оперативном контроле  $d$ . Значение  $d$ , вероятности обнаружения отказа оперативным контролем, варьируется от 0,1 до 0,9.

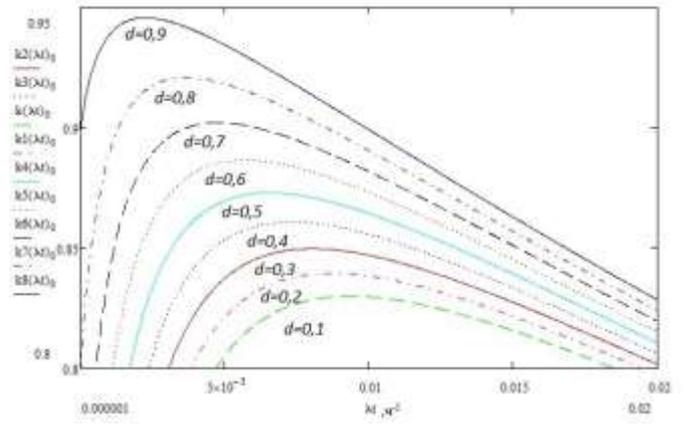


Рисунок 2. Зависимость коэффициента готовности к безопасному выполнению требуемых функций

Из представленных зависимостей видно, что слишком редкая инициализация тестирования повышает риск нахождения системы в опасном состоянии необнаруженных отказов, а слишком частое — неоправданно снижает коэффициент готовности из-за чрезмерных простоев, связанных с тестированием. Таким образом установлено существование оптимального периода инициализации тестового контроля, при котором достигается максимум готовности системы к безошибочному обслуживанию потока функциональных запросов.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена Марковская модель системы с выделением процессора и узла памяти, при реализации оперативного и периодически активизируемого программно-реализуемого тестового контроля. Поставлена задача оптимальной периодичности инициализации тестирования.

### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4261-р «Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года»: [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963861/>
- [2] Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
- [3] Казарин О.В., Шубинский И.Б. Надежность и безопасность программного обеспечения. М.: Юрайт, 2018. 342 с.
- [4] Astakhova T.N., Verzun N.A., Kasatkin V.V., Kolbanev M.O., Shamin A.A. Sensor network connectivity models. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019. N 5. P. 38–50. doi:10.31799/16848853-2019-5-38-50. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-38-50>
- [5] Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback. *Информационно-управляющие системы*, 2024, no. 6, pp. 58–65. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65
- [6] Татарникова Т.М., Архипцев Е.Д., Кармановский Н.С. Определение размера кластера и числа реплик высоконагруженных информационных систем Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 8. С. 646–651
- [7] Крылов Д. Р., Пойманова Е. Д., Тюрликов А. М. Модель реплицируемой системы хранения данных с использованием среднего возраста информации в качестве показателя актуальности данных. *Информационно-управляющие системы*, 2024, no. 3, pp. 11–23. doi:10.31799/1684-8853-2024-3-11-23
- [8] Sorin, Daniel. (2009). Fault Tolerant Computer Architecture. 10.2200/S00192EDI V01Y200904CAC005. URL: [https://www.researchgate.net/publication/220696325\\_Fault\\_Tolerant\\_Computer\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/220696325_Fault_Tolerant_Computer_Architecture)

- [9] Богатырев В.А., Богатырев С.В. Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов // Изв. вузов: Приборостроение. 2017. Т. 60. № 2. С. 171–177.
- [10] Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. Ульяновск: Печатный двор, 2016. 544 с.
- [11] Клименко А.Б. «Эффективное распределение вычислительных ресурсов в геораспределенных гетерогенных динамичных вычислительных средах.» моделирование, оптимизация и информационные технологии (2024)
- [12] Ананьев, А. В. et al. «Модели достоверности комплексного контроля состояний в пространственно-распределенных системах информационной безопасности.» Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics (2022)
- [13] Ярмолик, В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. - Минск : Бестпринт, 2019. - 387 с. : ил. - ISBN 978-985-90509-5-4.
- [14] Платонов А., В. И. Тимофеев. «Контроль целостности динамических объектов вычислительных систем с использованием метрических эталонов.» (2015).
- [15] Рубан И. В., Мартовицкий В. А., Лукова-Чуйко Н. В. Разработка модели мониторинга кластерных суперкомпьютеров. URL: <https://media.neliti.com/media/publications/306922-designing-a-monitoring-model-for-cluster-972bdd39.pdf>
- [16] Гончаренко В.А., Хомоненко А.Д., Халил М.М. Исследование балансировки нагрузки в трехканальных кластерных системах с адаптивной диспетчеризацией // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 19-31.
- [17] Хомоненко А.Д., Благовещенская Е.А., Проурзин О.В., Андрук А.А. Прогноз надежности кластерной вычислительной системы с помощью полумарковской модели альтернирующих процессов и мониторинга // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 72–82.
- [18] Богатырев, В. А. Оптимизация интервалов проверки информационной безопасности систем / В. А. Богатырев, А. В. Богатырев, С. В. Богатырев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 5(93). – С. 119-125. – EDN QWOGHR.
- [19] Богатырев В.А., Винокурова М.С., Петров П.А., Назарова М.Л., Шабиков Р.В. Контроль и безопасность функционирования дублированных компьютерных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 368–372. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-368-372
- [20] В. А. Богатырев, Д. Э. Лисичкин. «Оптимизация периодичности инициализации контроля на основе дублированных вычислений» // Программные продукты и системы. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-periodichnosti-initsializatsii-kontrolya-na-osnove-dublirovannyh-vychisleniy>.
- [21] 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

**Тахаутдинова Карина Ильшатовна** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; [karina.takhautdinova@mail.ru](mailto:karina.takhautdinova@mail.ru), [elibrary.ru:authorid=4954-3122](http://elibrary.ru:authorid=4954-3122).

**Богатырев Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [vladimir.bogatyrev@gmail.com](mailto:vladimir.bogatyrev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>,

# Optimization of the frequency of memory testing of computing systems

K.I. Takhautdinova, V.A. Bogatyrev

**Abstract**— One of the effective measures to increase readiness for error-free fault-tolerant operation of computer systems is their periodic test control combined with operational control. At the same time, the problem arises of resolving a technical contradiction caused by the fact that an increase in the frequency of testing activation leads to an increase in downtime, and a decrease leads to an increase in the likelihood of dangerous operating conditions in conditions of undetected failures. The paper proposes an approach for finding the optimal frequency of testing based on Markov models for systems with dedicated computing and memory nodes. The practical significance of the study lies in the possibility of using the model to increase the system's error-free availability while reducing downtime during testing.

**Keywords** — operational control, test control, Markov model, error-free operation coefficient, optimization, testing frequency.

## REFERENCES

- [1] Decree of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2022 No. 4261-r "On approval of the Strategy for the Development of the automotive industry of the Russian Federation until 2035": [Electronic resource]. — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963861/>
- [2] Polovko A.M., Gurov S.V. Fundamentals of reliability theory. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. 702 p.
- [3] Kazarin O.V., Shubinsky I.B. Reliability and security of software. Moscow: Yurayt, 2018. 342 p.
- [4] Astakhova T.N., Verzun N.A., Kasatkin V.V., Kolbanov M.O., Shamin A.A. Sensor network connectivity models. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2019. N 5. P. 38–50. doi:10.31799/16848853-2019-5-38-50. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-38-50>
- [5] Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. The impact of the number of unique preambles on the stability region of the ALOHA algorithm with early feedback. *Information and Control Systems*, 2024, No. 6, pp. 58–65. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-58-65
- [6] Tatarnikova T.M., Arkhiptsev E.D., Karmanovsky N.S. Determining the cluster size and the number of replicas of highly loaded information systems. *Izvestia of Higher Educational Institutions. Instrument engineering*, 2023. Vol. 66. No. 8. pp. 646–651
- [7] Krylov D. R., Poymanova E. D., Tyurlikov A.M. A model of a replicated data storage system using the average age of information as an indicator of data relevance. *Information and Control Systems*, 2024, No. 3, pp. 11–23. doi:10.31799/1684-8853-2024-3-11-23
- [8] Sorin, Daniel. (2009). Fault Tolerant Computer Architecture. 10.2200/S00192ED1V01Y200904CAC005. URL: [https://www.researchgate.net/publication/220696325\\_Fault\\_Tolerant\\_Computer\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/220696325_Fault_Tolerant_Computer_Architecture)
- [9] Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Reliability of multicluster systems with the redistribution of query flows // *Izv. vuzov: Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60. No. 2. pp. 171–177.
- [10] Shubinsky I.B. Reliable fault-tolerant information systems. Synthesis methods. Ulyanovsk: Printing Yard, 2016. 544 p.
- [11] Klimenko A.B. "Efficient allocation of computing resources in geodistributed heterogeneous dynamic computing environments." *MODELING, OPTIMIZATION AND INFORMATION TECHNOLOGY* (2024)
- [13] Ananyev, A.V. et al. "Reliability models of complex state control in spatially distributed information security systems." *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics* (2022)
- [14] Yarmolik, V. N. Control and diagnostics of computing systems / B. N. Yarmolik. Minsk: Bestprint, 2019. 387 p.: ill. - ISBN 978-985-90509-5-4
- [15] Platonov A., V. I. Timofeev. "Integrity control of dynamic objects of computing systems using metric standards." (2015).
- [16] Ruban I. V., Martovitsky V. A., Lukova-Chuiko N. V. Development of a monitoring model for cluster supercomputers. URL: <https://media.neliti.com/media/publications/306922-designing-a-monitoring-model-for-cluster-972bdd39.pdf>
- [17] Goncharenko V.A., Khomonenko A.D., Khalil M.M. Study of load balancing in three-channel cluster systems with adaptive dispatching // *High-tech technologies in space exploration of the Earth*. – 2025. – Vol. 17. No. 2. – pp.19–31.
- [18] Khomonenko A.D., Blagoveshchenskaya E.A., Prouzina O.V., Andruk A.A. Forecasting the reliability of a cluster computing system using a semi-Markov model of alternating processes and monitoring // *High-tech technologies in Earth spaceresearch*, 2018, vol. 10, No. 4, pp. 72–82.
- [19] Bogatyrev, V. A. Optimization of intervals for checking information security of systems // V. A. Bogatyrev, A.V. Bogatyrev, S. V. Bogatyrev // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2014. – № 5(93). – Pp. 119–125. – EDN QWOGHR.
- [20] Bogatyrev V.A., Vinokurova M.S., Petrov P.A., Nazarova M.L., Shabakov R.V. Control and safety of functioning of duplicated computer systems // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2017. Vol. 17. No. 2. pp. 368–372. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-368-372
- [21] In A. Bogatyrev, D.E. Lisichkin. "Optimization of the frequency of control initialization based on duplicated calculations" // *Software products and systems*. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-periodichnosti-initsializatsii-kontrolya-na-osnove-dublirovannyh-vychisleniy>
- [22] Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Optimization of the frequency of monitoring the security of computer systems // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2015. Volume 15. No. 2. pp. 300–304.

**Takhautdinova Karina Ilshatovna**, PhD Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation; [karina.takhautdinova@mail.ru](mailto:karina.takhautdinova@mail.ru), elibrary: authorid=4954-3122.

**Bogatyrev Vladimir Anatolyevich**, D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, 197101, Russian Federation, [vladimir.bogatyrev@gmail.com](mailto:vladimir.bogatyrev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>