

## Оценка и прогнозирование надёжности для высоконадёжных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных

Г.В. Петушков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: [petushkov@list.ru](mailto:petushkov@list.ru)

Рассматриваются вопросы оценки и прогнозирования надёжности высоконадёжных систем, например, центров обработки данных, включающих большое число серверов. Оценивается частота появления перемежающихся отказов и сбоев программного обеспечения в серверах. Предлагаются методики мониторинга и прогнозирования отказов серверов, исключающие одновременные отказы многих устройств.

**Ключевые слова:** высоконадёжные программно-аппаратные системы, многопроцессорные серверы, оценки надёжности аппаратной и программной части, прогнозирование надёжности.

**Для цитирования:** Петушков Г.В. Оценка и прогнозирование надёжности для высоконадёжных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):21-26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26>

## Evaluation and reliability prediction for highly reliable software and hardware systems: The case of data processing centers

Gregory V. Petushkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: [petushkov@list.ru](mailto:petushkov@list.ru)

Methods for estimating and predicting the reliability levels of highly reliable systems are analyzed, for example, data centers that include a large number of servers. The frequency of interleaved and software failures on servers is estimated. Methods for monitoring and forecasting server failures are proposed, which exclude simultaneous failures of many devices.

**Keywords:** highly reliable software and hardware systems, multiprocessor servers, reliability assessment of hardware and software, reliability prediction.

**For citation:** Petushkov G.V. Evaluation and prediction of reliability for highly reliable software and hardware systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):21-26 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26>

Современные программно-аппаратные системы, например, центры обработки данных (ЦОД), поддерживающие выполнение разнообразных приложений пользователей в интернете, обязаны быть высоконадёжными системами. Высокая надёжность достигается как надёжностью функционирования входящих в их состав элементов (серверного оборудования), так и резервированием оборудования, используемого для выполнения приложений в ЦОД.

Сложность и высокая надёжность программного и аппаратного оборудования серверов ЦОД делает актуальной и нетривиальной задачу оценки и прогнозирования надёжности отдельных серверов и ЦОД в целом, при этом ЦОД должен выполнять свои функции непрерывно.

Для отдельных серверов ЦОД характерными типами отказов функционирования являются сбои или перемежающиеся отказы, связанные прежде всего с проявлением однократных или многократных сбоев в работе современных микросхем высокой степени интеграции, а также ошибок программного обеспечения и требующие, как минимум, перезагрузки сервера для их устранения [1–3]. Особенности проявления ошибок, характерных для сбоев программного обеспечения, рассмотрены в работах [4–7]. Внезапные или катастрофические отказы аппаратных средств сервера также возможны, но проявляются заметно реже, хотя их устранение длится обычно дольше, поскольку требует поиска источника отказа, замены соответствующего оборудования и тестирования обновлённой конфигурации сервера.

Сам сервер является достаточно сложным программно-аппаратным устройством, поэтому стандартные методики расчёта его надёжности на основе интенсивностей отказов компонентов [8–11] могут дать результаты, заметно отличающиеся от реальных. Кроме того, более распространённым является первый из рассмотренных типов отказов, связанный с проявлением ошибки программного обеспечения (ПО), что не учитывается стандартными методиками. Это требует получения оценок надёжности по отношению к таким отказам на основе информации, относящейся к отказам и сбоям в работе данного конкретного сервера.

Наиболее подходящим математическим аппаратом для прогнозирования характеристик надёжности сервера по данным об истории его эксплуатации является модель Джелинско-Моранды [12]. Данная модель не единственная, но является наиболее часто используемой, поскольку близка по структуре к расчётам надёжности аппаратной части сервера. Модель основана на следующих допущениях: время работы до следующего отказа распределено экспоненциально, а интенсивность отказов ПО пропорционально количеству оставшихся в программном обеспечении ошибок. Согласно этим допущениям вероятность безотказной работы ПО  $P(t)$  как функция времени на  $i$ -ом отрезке времени равна

$$P(t_i) = e^{-\lambda_i t_i}, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов, равная

$$\lambda_i = C(N - (i - 1)). \quad (2)$$

В выражении (2)  $C$  – коэффициент пропорциональности, а  $N$  – первоначальное число ошибок в ПО.

Отсчёт времени  $t_i$  начинается от момента последнего  $(i-1)$ -го отказа ПО.

Выражение для определения значения коэффициента  $C$  в модели приводится в литературе [8]. Например, если в процессе эксплуатации сервера получены значения интервалов времени, через которые наступали сбои ПО:  $t_1 = 10$ ,  $t_2 = 15$ , выраженные в сутках, значение  $C$  определяется как

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{(N-i+1)}}{\sum_{i=1}^{k-1} t_i}, \quad (3)$$

где  $k$  – номер прогнозируемого отказа,

$t_i$  – значения интервалов времени ( $i = 1, 2$ ).

Тогда для  $N = k = 3$ , рассматривая третий ожидаемый отказ, получаем:

$$C = \frac{1/2 + 1/3}{10 + 15} = 0.033.$$

Этот расчёт позволяет дать оценку значениям интенсивностей отказа

$$\lambda_1 = 3C = 0.099,$$

$$\lambda_2 = 2C = 0.066,$$

$$\lambda_3 = C = 0.033.$$

откуда следует, что прогнозируемое время наработки на третий отказ ПО составляет в сутках:

$$T_3 = 1/\lambda_3 = 30.$$

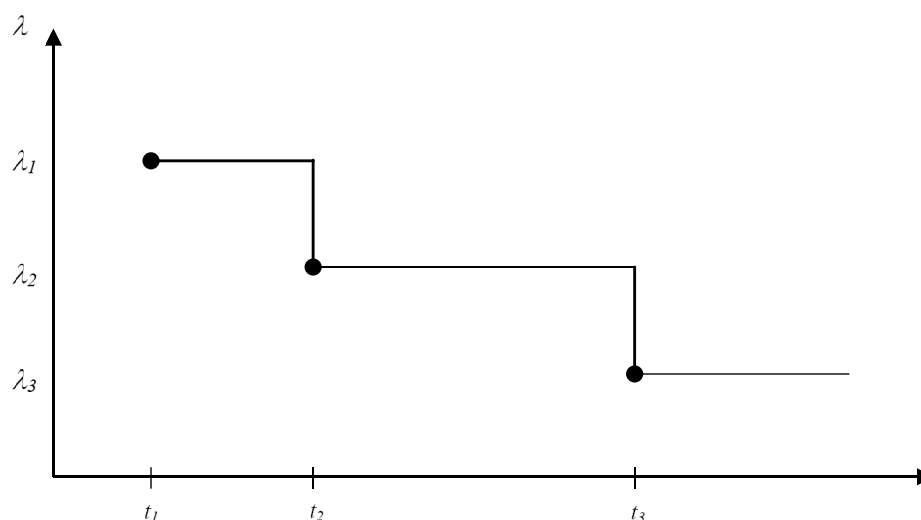
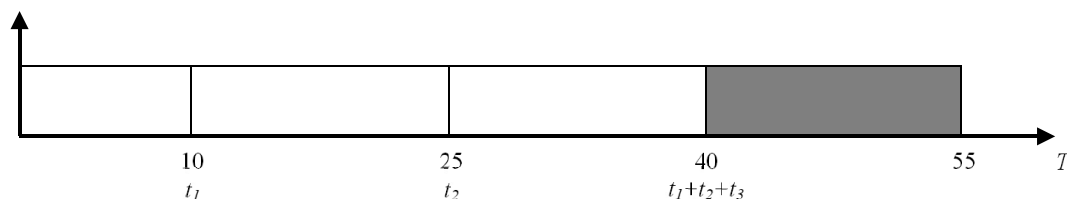


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов  $\lambda$  по модели Джелинского-Моранды.

Внесём некоторое уточнение в модель, поскольку неочевидно, что и далее интенсивность отказов будет снижаться. Известно [12,13], что на этапе нормальной эксплуатации изделия интенсивность отказов стабильна и не зависит от времени. Предлагается выдвинуть две гипотезы в отношении интенсивности отказов к моменту третьего отказа: интенсивность отказов стабилизируется на уровне  $\lambda_2$  и, иначе, интенсивность отказов снижается до уровня  $\lambda_3$ . Этим гипотезам соответствуют две оценки ожидаемого времени наработки на третий отказ: значение  $t'_3 = 15$  по первой гипотезе и значение  $t''_3 = 30$  по второй.



**Рис. 2.** Иллюстрация для астрономического времени  $T$  времени появления третьего отказа от момента  $T$  40 суток работы до момента  $T$  55 суток.

Интервал  $\{40,55\}$ , выделенный штриховкой на рис. 2, назовём интервалом ожидания отказа.

Далее в процессе эксплуатации сервера возникает третий отказ или сбой в работе сервера и мы получаем реальное время ожидания третьего отказа  $t_3^0 = 25$  суток.

В соответствии с вновь полученными экспериментальными данными можно провести прогноз времени появления четвёртого отказа, определив новое значение  $C$  и  $t_4$ .

$$C = \frac{1/2 + 1/3 + 1/4}{10 + 15 + 25} = 0.022,$$

$$t_4'' = 1/C = 45.$$

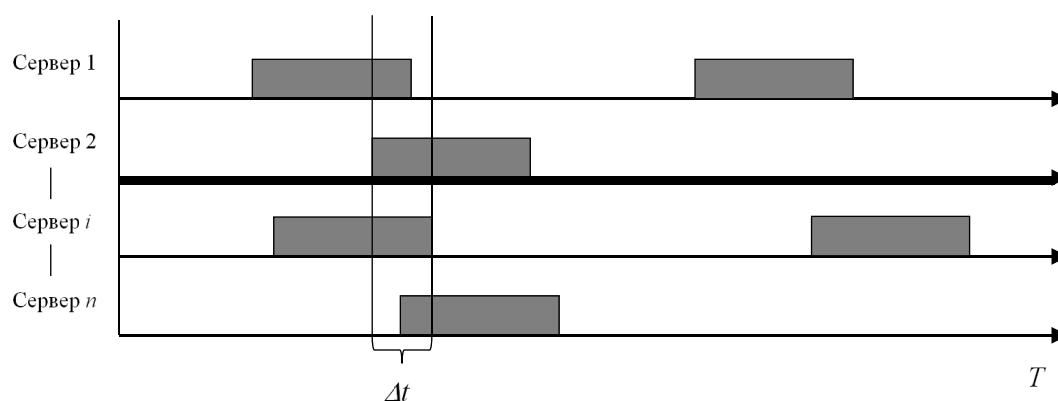
Аналогично предыдущему случаю принимаем  $T_4' = 50 + 25 = 75$  и  $T_4'' = 50 + 45 = 95$  и выделяем интервал ожидания четвёртого отказа в виде  $\{75,95\}$  суток.

Ещё раз подчеркнём, что все прогнозы выполняются на основе данных, относящихся к данному конкретному серверу. И этот анализ может быть продолжен по мере получения новых экспериментальных данных.

Теперь вернёмся к вопросу работы ЦОД как системы, состоящей из серверов, которая должна функционировать непрерывно. Расчёт и прогнозирование характеристик работы такой системы можно проводить по усреднённым характеристикам надёжности работы входящих в неё устройств как это предлагалось в [13–15] с учётом имеющегося резервирования. Однако у разработчиков не всегда есть набор усреднённых характеристик и даже к имеющимся характеристикам уровень доверия может быть не высок.

В данной работе предлагается иной подход к прогнозированию надёжности системы, основанный на индивидуальном прогнозировании характеристик надёжности входящих в неё устройств.

Для системы (ЦОД) необходимо построить схему мониторинга событий в виде сбоев и отказов, происходящих в устройствах (серверах) и принимать меры по повышению надёжности и непрерывности функционирования системы на основе индивидуального прогнозирования отказов устройств.



**Рис. 3.** Графический пример результатов индивидуального прогнозирования интервалов ожидания отказа для серверов, полученный по приведённой в данной работе методике.

Интервалы ожидания отказа для отдельных серверов заштрихованы на рис. 3. Такое графическое представление позволяет выделить интервалы  $\Delta t$ , в которых ожидаются сбои в работе сразу нескольких серверов, что может привести к сбою в работе ЦОД. Выделение таких интервалов в результате проводимого мониторинга и прогнозирования отказов серверов позволяет принимать дополнительные меры по борьбе за непрерывность функционирования системы (ЦОД) путём перераспределения нагрузки на серверы и более быстрого запуска в работу отказавших в этот период серверов. Подобным же образом в примере на рис. 3 могут быть учтены внезапные отказы оборудования серверов, которые, однако, требуют большего времени для восстановления работоспособности сервера.

Методика оценки надёжности и непрерывности функционирования системы на основе индивидуального прогнозирования надёжности входящих в неё устройств включает в себя следующие шаги: построение прогноза по интервалу времени проявления следующего отказа индивидуально для каждого прибора (сервера) в системе; мониторинга для выявления совпадения во времени этих интервалов для разных приборов в системе; применения средств смягчения и парирования отказов в случае, если совпадение моментов проявления отказов угрожает непрерывности функционирования системы.

Предложенная методика оценки надёжности и непрерывности функционирования системы на основе индивидуального прогнозирования надёжности входящих в неё устройств применима не только для ЦОД, но, например, для крупных вычислительных систем и сетей. В целом методику можно отнести к классу алгоритмов, в которых обработка больших объёмов данных даёт улучшение и уточнение получаемых прогнозов, т. е. к алгоритму работы с «большими данными».

### Литература:

1. Кирпичников А.П., Васильев С.Н. Особенности современной микроэлектроники и вопросы построения систем управления высокой надёжности и безопасности. *Надёжность*. 2017;17(3):10-16. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-3-10-16>
2. Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А. Метод определения долговечности микросхем. *Надёжность*. 2019;19(3):3-6. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6>
3. Егоров И.В. Имитационная модель надёжности резервированной вычислительной системы с периодическим восстановлением информации. *Надёжность*. 2018;18(3):10-17. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-3-10-17>
4. Потапов И.В. Проблематика в области надёжности программных систем. *Надёжность*. 2015;(1):53-61. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-11-1-53-61>
5. Алпеев А.С. Терминология надёжности. *Надёжность*. 2016;16(4):43-45. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2016-16-4-43-45>
6. Шубинский И.Б. Надёжные отказоустойчивые информационные системы. М.: ООО "Журнал "Надёжность", 2016. 544 с. ISBN 978-5-7572-0399-7

7. Антонов А.В., Галивец Е.Ю., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Анализ дерева отказов в среде программирования R. *Надежность*. 2018;18(1):4-13. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-1-4-13>
8. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Мосягина Н.Г., Набатов К.А. Надежность информационных систем. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 160 с. ISBN 978-5-8265-0911-1
9. Лаврищева Е.М., Петрухин В.А. Методы и средства инженерии программного обеспечения: учебное пособие. М.: МФТИ, 2006. 304 с.
10. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 560 с. ISBN 5-94157-542-4
11. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. 479 с. ISBN 5-469-00102-4
12. Иблуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. М.: Высшая школа, 1989. 216 с. ISBN 5-06-000130-X
13. Коваленко С.М., Платонова О.В. Анализ задачи эффективной эксплуатации комплексов систем автоматизации и расчеты надежности на основе непрерывных моделей. *Известия ВУЗов. Машиностроение*. 2014;8(653):75-79. <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2014-8-75-79>
14. Коваленко С.М. Оценка надежности информационно-управляющих систем на основе непрерывных моделей. *Вопросы радиоэлектроники*. 2005;4(2):143-146.
15. Хеннеси Джон Л., Паттерсон Дэвид А. Компьютерная архитектура. Количественный подход, 5-е изд. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 935 с. ISBN 978-5-94836-413-1

### References:

1. Kirpichnikov A.P., Vasiliev S.N. Particular characteristics of today's microelectronics and matters of highly dependable and secure control systems design. *Nadezhnost' = Dependability*. 2017;17(3):10-16 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-3-10-16>
2. Dolgoplov B.A., Zayko Y.G., Mikhaylov V.A. A method of identifying the durability indicator of microcircuitry. *Nadezhnost' = Dependability*. 2019;19(3):3-6 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6>
3. Egorov I.V. Simulation model of dependability of redundant computer systems with recurrent information recovery. *Nadezhnost' = Dependability*. 2018;18(3):10-17 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-3-10-17>
4. Potapov I.V. Issues of software systems dependability. *Nadezhnost' = Dependability*. 2015;(1):53-61 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-1-53-61>
5. Alpeiev A.S. Definitions of dependability. *Nadezhnost' = Dependability*. 2016;16(4):43-45 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2016-16-4-43-45>
6. Shubinskii I.B. *Nadezhnye otkazoustoichivye informatsionnye sistemy* (Reliable fail-safe information systems). M.: "Zhurnal "Nadezhnost'"; 2016. 544 p. (in Russ.) ISBN 978-5-7572-0399-7
7. Antonov A.V., Galivets E.Y., Chepurko V.A., Cherniaev A.N. Fault tree analysis in the R programming environment. *Nadezhnost' = Dependability*. 2018;18(1):4-13 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-1-4-13>
8. Gromov Yu.Yu., Ivanova O.G., Mosyagina N.G., Nabatov K.A. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* (Reliability of information systems). Tambov: Izd-vo GOU VPO TGTU; 2010. 160 p. (in Russ.) ISBN 978-5-8265-0911-1
9. Lavrishcheva E.M., Petrukhin V.A. *Metody i sredstva inzhenerii programmnoy obespecheniya: uchebnoe posobie* (Methods and means of software engineering). Moscow: MFTI; 2006. 304 p. (in Russ.)
10. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of reliability theory). Sankt Peterburg: BKhV-Peterburg; 2006. 560 p. (in Russ.) ISBN 5-94157-542-4
11. Cherkesov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* (Reliability of hardware and software systems). Sankt Peterburg: Piter; 2005. 479 p. (in Russ.) ISBN 5-469-00102-4
12. Iyudu K.A. *Nadezhnost', kontrol' i diagnostika vychislitel'nykh mashin i sistem* (Reliability, control and diagnostics of computers and systems). Moscow: Vysshaya shkola; 1989. 216 p. (in Russ.) ISBN 5-06-000130-X
13. Kovalenko S.V., Platonova O.V. Analysis of the operational efficiency of complex automation systems and the calculation of their reliability on the basis of continuous models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2014;8(653):75-79 (in Russ.) <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2014-8-75-79>
14. Kovalenko S.M. Reliability assessment of information management systems based on continuous models. *Voprosy radioelektroniki* = Issues of radio electronics. 2005;4(2):143-146 (in Russ.)
15. Hennessey John L., Patterson David A. *Komp'yuternaya arkhitektura. Kolichestvennyi podkhod* (Computer Architecture). Moscow: TEKHNOSFERA; 2016. 935 p. (in Russ.) ISBN 978-5-94836-413-1

### Об авторе

**Петушков Григорий Валерьевич**, аспирант кафедры Вычислительная техника Института Информационных технологий, директор Института молодежной политики и международных отношений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

### About the author

**Gregory V. Petushkov**, Postgraduate Student of the Department of Computer Engineering of the Institute of Information Technologies, Director of the Institute of Youth Policy and International Relations MIREA - Russian Technological University ( Vernadskogo pr., 78, A-404, 119454, Moscow, Russia).