

А.С. Швецов, В.Г. Терехов

---

## ОЦЕНИВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ

---

**Аннотация.** В статье рассмотрен подход оценивания надежности программного обеспечения вычислительной системы с учетом использования технологии виртуализации. Проведена аналогия между структурным резервированием и логикой работы программного обеспечения. Показано, что использование виртуализации существенно повышает надежность программного обеспечения и функционирования вычислительной системы.

*Ключевые слова:* вычислительная система, виртуализация, надежность программного обеспечения, резервирование.

A.S. Shvetsov, V.G. Terekhov

---

## ASSESSMENT OF FAULT-TOLERANT COMPUTING SYSTEM SOFTWARE RELIABILITY WITH CONSIDERATION OF MUTUAL VIRTUALIZATION OF ELEMENTS

---

**Abstract.** The article considers an approach to assessing the reliability of computer system software taking into account the use of virtualization technology. An analogy is drawn between structural redundancy and the logic of software operation. It has been shown that the use of virtualization significantly increases the reliability of software and the functioning of the computing system.

*Keywords:* computing systems, virtualization, software reliability, redundancy.

### *Введение*

Современная вычислительная система (далее – ВС), функционирующая продолжительное время и способная к масштабированию, чаще всего характеризуется неоднородностью аппаратного и программного обеспечения. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации со временем приходится заменять вышедшее из строя аппаратное и, как следствие, программное обеспечение. Это приводит к невозможности простого переноса вычислительных задач между аппаратным обеспечением, так как вычислительные задачи могут быть ориентированы на разные операционные системы (как тип, так и версия, например, Astra Linux, Debian Linux, Solaris, Windows 11), а операционная система поддерживает определенное аппаратное обеспечение. В связи с этим является целесообразным использование систем виртуализации, которые для решения вычислительных задач позволяют создавать виртуальные машины, не зависящие от аппаратно-программного обеспечения хостовых ЭВМ.

*Виртуализация* – это изоляция вычислительных процессов и ресурсов средств вычислительной техники друг от друга.

С разработкой программных продуктов для виртуализации появилась возможность на имеющемся оборудовании запускать и использовать различные операционные системы и другие программные приложения, а также увеличивать с помощью инструментов виртуализации рабочую нагрузку на единицу оборудования. Вместо двух или даже деся-

**Швецов Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: сетевые технологии, защита информации в информационно-вычислительных сетях. Автор более 30 опубликованных научных работ. SPIN-код: 8282-5162, AuthorID: 884093. Электронный адрес: vka\_24kaf@mil.ru

**Терехов Владимир Геннадиевич**

кандидат военных наук, доцент, старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: сетевые технологии, устойчивость функционирования информационно-вычислительных систем и сетей, защита информации в информационно-вычислительных сетях. Автор более 40 опубликованных научных работ. SPIN-код: 3266-6624, AuthorID: 726737. Электронный адрес: vka\_24kaf@mil.ru

ти серверов с установленными операционными системами различных семейств и пользовательским программным обеспечением, загруженных на 5...20 %, можно использовать один на 50...70 % [1].

Однако обеспечение высокой надежности, отказоустойчивости и непрерывности вычислительного процесса напрямую зависит от надежного функционирования аппаратных средств вычислительной техники и используемого программного обеспечения (далее – ПО).

*Сущность подхода*

Проблема надежности программ давно приобрела большое значение в связи с постоянным увеличением объемов и сложности разрабатываемого ПО. Несмотря на общепризнанность важности учета надежности ПО и значительное количество теоретических работ в этой области [2], на практике ей уделяется недостаточное внимания.

Оцениванию надежности вычислительных систем с миграцией виртуальных машин посвящено большое количество работ [3]. При этом основное внимание уделено аппаратной составляющей, в то время как сбои в работе системы чаще происходят по вине ПО.

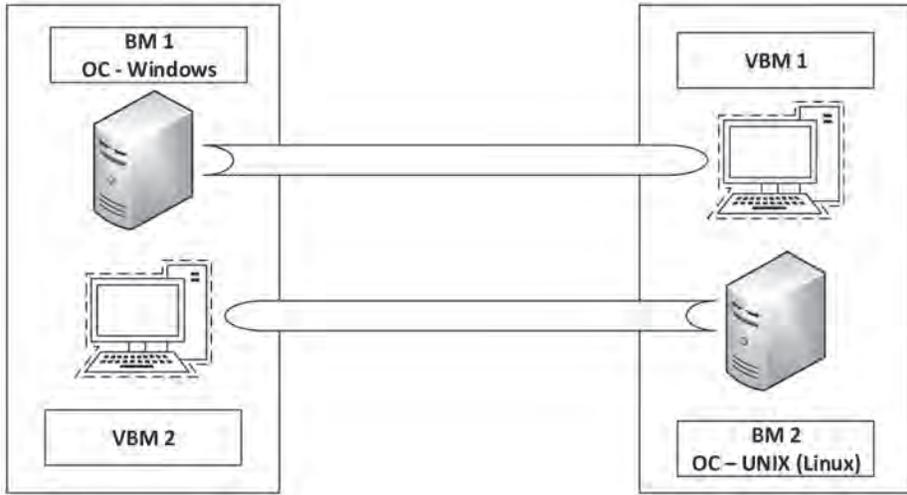
Рассмотрим вариант оценки надежности программного обеспечения ВС, состоящей из двух вычислительных машин (далее – ВМ) (см. Рисунок 1).

На ВМ 1 установлена операционная система А (например, из семейства Windows), прикладные Windows-приложения и программа виртуализации, в которой создана и работает виртуальная копия хостового компьютера №2 (VBM 2).

На ВМ 2 установлена операционная система В (например, из семейства UNIX (Linux)), прикладные приложения UNIX (Linux) и программа виртуализации, в которой создана и работает виртуальная копия хостового компьютера № 1 (VBM 1).

Такое сочетание предполагает запуск копии физической ВМ виртуально в фоновом режиме, что позволяет после сбоя в работе физической ВМ без прерываний продолжить вычислительный процесс на виртуальной машине другого физического компьютера. Порядок миграции данных и создание срезов вычислительных процессов рассмотрен в работе [1].

Пусть необходимо оценить надежность ПО, включающего операционные системы А, В и соответствующие им приложения (пользовательское ПО А, В), с учетом взаимной виртуализации вычислительных машин.



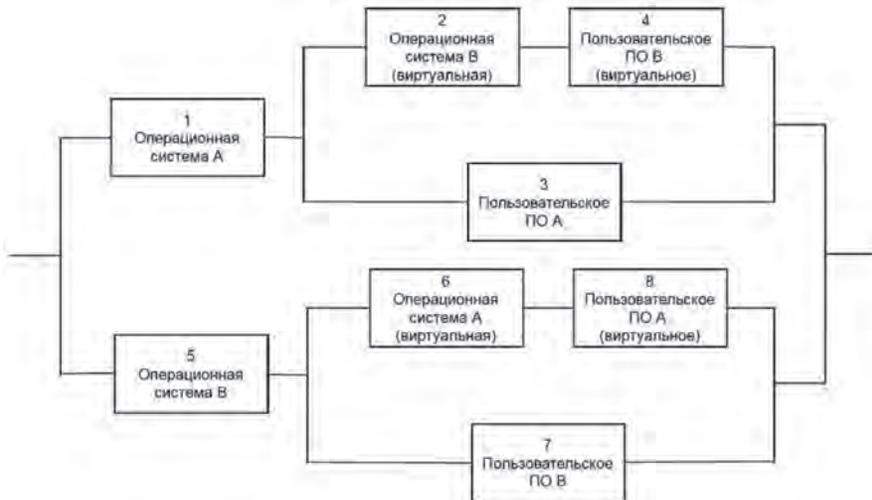
**Рисунок 1.** Структура отказоустойчивой ВС с применением технологии виртуализации

*Источник:* здесь и далее рисунки выполнены авторами

При сбое ПО (операционной системы или пользовательского ПО) в работе VM 1 (VM 2) вычислительный процесс будет продолжаться в своей виртуальной копии VBM-1 (VBM-2) на VM 2 (VM 1).

Очевидно, что описанная логика работы системы полностью повторяет идею структурного резервирования в классической теории надежности. Иными словами, можно говорить о виртуальном резервировании программного обеспечения. Тогда для получения оценки надежности функционирования ПО возможно применить известные методы анализа надежности технических систем [4].

Представим описанный выше процесс функционирования ПО как резервированную систему без восстановления и составим для него структурную схему (см. Рисунок 2).



**Рисунок 2.** Схема функционирования программного обеспечения

Оценивание надежности программного обеспечения вычислительной системы...

Полагая известными вероятности безотказной работы блоков ( $P_i$ ), запишем результирующее выражение для вероятности безотказной работы всей системы:

$$P_c = P_1P_3 + P_5P_7 + P_1P_2P_4 + P_5P_6P_8 - P_1P_2P_3P_4 - P_5P_6P_7P_8 - P_1P_3P_5P_7 - P_1P_3P_5P_6P_8 - P_1P_2P_4P_5P_7 + P_1P_3P_5P_6P_7P_8 + P_1P_2P_3P_4P_5P_7 - P_1P_2P_4P_5P_6P_7 + P_1P_2P_4P_5P_6P_7P_8 + P_1P_2P_3P_4P_5P_6P_8 - P_1P_2P_3P_4P_5P_6P_7P_8.$$

В теории надежности программного обеспечения существует большое количество моделей, позволяющих описать вероятность безотказной работы как функцию времени через возведение в степень основания натурального логарифма (например, модель Мусы [5], модели класса NHPP [6; 7] и др.). В нашем случае для экспоненциальной модели  $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$  (см. Таблицу) сравним вероятности безотказной работы ПО без резервирования (задействованы только блоки 1 и 3) с работой виртуальной машины на той же ВМ (блоки 1, 2, 3 и 4) и для описанного выше способа резервирования с использованием второй ВМ (все блоки). Значения интенсивностей отказов взяты для примера и сопоставимы с данными, приведенными в [8]. Результаты получены в среде Mathcad и представлены на Рисунке 3. Надежность системы с резервированием, естественно, выше, чем без него.

Таблица

Заданные интенсивности отказов

№ блока	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_i \cdot 10^{-6}$ 1/ч	2	1,5	4	3	2	1,5	3	4

Используя подобный подход, можно также оценить надежность программного обеспечения системы с восстановлением (перезапуском). Аналогичная задача для аппаратного обеспечения (двух физических серверов с виртуальными машинами) приведена в [3].

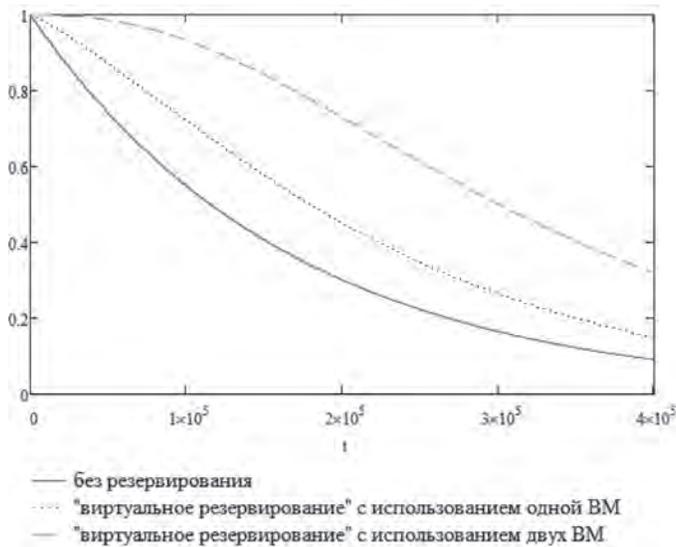


Рисунок 3. Вероятности безотказной работы программного обеспечения

Полагая законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления экспоненциальными, а приоритет обслуживания – прямым (отказавшее ПО сразу восстанавливается путем перезапуска), строим граф состояний системы и формируем систему дифференциальных уравнений Колмогорова. Решив ее любым способом при нулевых начальных условиях, можно рассчитать характеристики надежности системы.

#### Заключение

Таким образом, получить приблизительную оценку надежности программного обеспечения ВС с учетом взаимной виртуализации элементов можно при проведении аналогии между структурным резервированием аппаратуры и логикой работы программного обеспечения.

Использование виртуализации существенно повышает надежность программного обеспечения и функционирования вычислительной системы.

#### Литература

1. Лоу С. VMware vSphere 4: полное руководство / Пер. с англ. А.В. Журавлева, А.Г. Гузиковича, В.С. Иващенко М. : Дialeктика, 2010. 784 с. ISBN 978-5-8459-1651-8.
2. Смагин В.А., Дорохов А.Н. Основы теории надежности программного обеспечения : учебник для студентов. СПб. : БГТУ, 2009. 303 с. ISBN 978-5-85546-479-9. EDN QMULYB.
3. Алексанков С.М., Богатырев В.А., Деркач А.Н. Модель надежности отказоустойчивого кластера с миграцией виртуальных машин // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 1. С. 103–108. EDN WFDGTK. DOI: 10.15827/0236-235X.125.103-108
4. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 702 с. ISBN 978-5-94157-541-1.
5. Musa J.D. The measurement and management of software reliability // Proceedings of the IEEE. 1980. Vol. 68. No. 9. Pp. 1131–1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11812>
6. Goel A.L., Okumoto K. Time-dependent error-detection rate model for software reliability and other performance measures // IEEE Transactions on Reliability. 1979. Vol. R-28. No. 3. P. 206–211. DOI: 10.1109/TR.1979.5220566
7. Мороз Г.Б. Пуассоновские модели роста надежности программного обеспечения и их приложение. Аналитический обзор // Управляющие системы и машины. 1996. № 1-2. С. 69–84.
8. Чернов В.Ю., Никитин В.Г., Иванов Ю.П. Надёжность авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов : Учебное пособие. СПб. : ГУАП, 2004. 96 с. ISBN 5-8088-0100-1.

#### References

1. Lowe S. (2009) *Mastering VMware vSphere 4: The Complete guide*. Sybex. 696 p. ISBN 9780470481387 (Russian edition: transl. by A.V. Zhuravlev, A.G. Guzikovich, V.S. Ivashchenko, Moscow: Dialektika Publ., 2010. 784 p.).
2. Smagin V.A., Dorokhov A.N. (2009) *Osnovy teorii nadezhnosti programmnogo obespecheniya* [Fundamentals of the theory of software reliability : Textbook. St. Petersburg : Baltic State Technical University “Voenmekh” Publ. 303 p. ISBN 978-5-85546-479-9. (In Russian).
3. Aleksankov S.M., Bogatyrev V.A., Derkach A.N. (2019) Reliability Model of a fault-tolerant cluster with virtual machine migration. *Software and systems*. Vol. 32. No. 1. Pp. 103–108. DOI: 10.15827/0236-235X.125.103-108 (In Russian).

4. Polovko A.M., Gurov S.V. (2006) *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. St. Petersburg : BHV-Petersburg Publ. 702 p. ISBN 978-5-94157-541-1. (In Russian).
5. Musa J.D. (1980). The measurement and management of software reliability. In: *Proceedings of the IEEE*. Vol. 68. No. 9. Pp. 1131–1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11812>
6. Goel A. L., Okumoto K. Time-dependent error-detection rate model for software reliability and other performance measures. In: *IEEE Transactions on Reliability*. 1979. Vol. R-28. No. 3. Pp. 206–211. DOI: 10.1109/TR.1979.5220566
7. Moroz G.B. (1996) Poisson Models of software reliability growth and their application: Analytical review. *Upravlyayushchie sistemy i mashiny* [Control systems and computers]. No. 1-2. Pp. 69–84. (In Russian).
8. Chernov V.Yu., Nikitin V.G., Ivanov Yu.P. (2004) *Nadezhnost' aviatsionnykh priborov i izmeritel'no-vychislitel'nykh kompleksov* [Reliability of aircraft instruments and measuring-computing systems] : Tutorial. St. Petersburg : St. Petersburg University of Aerospace Instrumentation (GUAPP Publ. 96 p. ISBN 5-8088-0100-1. (In Russian).