

УДК 519.237.5

DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.553-562

Программный комплекс имитационного моделирования и расчета стационарных вероятностей и оценки надежности резервированной системы с произвольными распределениями времени безотказной работы и ремонта её элементов

Г. Ж. К. Уанкпо¹, Д. В. Козырев^{1,2}

¹ Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

* gibsonhouankpo@yahoo.fr

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

Аннотация

С быстрым развитием и распространением компьютерных сетей и информационных технологий, перед исследователями возникают новые сложные и комплексные задачи как прикладного, так и теоретического характера по исследованию надежности и доступности сетей и систем передачи данных. Одной из них является исследование надежности резервированных систем передачи данных между устройствами. Одним из основных условий стабильной работы системы передачи данных между устройствами является нечувствительность качества и эффективности системы к изменениям исходных параметров модели. Анализ такой чувствительности, который предполагается провести в рамках данной работы, является одним из новых направлений исследований сетей передачи данных последующих поколений.

Мы рассматриваем имитационную модель восстанавливаемой системы передачи данных как модель замкнутой однородной системы холодного резервирования с одним ремонтным устройством с произвольной функцией распределения времени безотказной работы и произвольной функцией распределения времени ремонта её элементов. Для анализа и сравнения результатов были выбраны следующие распределения времени безотказной работы и времени ремонта элементов: Экспоненциальное (M), Вейбулла-Гнеденко (WB) и Логнормальное (LN).

Ранее в [1] было показано, что явные аналитические выражения для стационарного распределения рассматриваемой системы удается получить не всегда. Разработанная в этой работе имитационная модель позволила исследовать надежность системы, определяемую как стационарную вероятность безотказной работы системы, а также получить оценки характеристик надёжности системы. Также получены значения коэффициента ρ (относительная скорость восстановления) при котором достигается заданный уровень надежности, построены графики зависимости вероятности безотказной работы системы и графики равномерной разности результатов имитационной модели для разных распределений в зависимости от относительной скорости восстановления. Программная реализация алгоритмов имитационного моделирования была осуществлена на основе языка R.

Ключевые слова: имитационное моделирование, надежность резервированных систем, относительная скорость восстановления, вероятность безотказной работы системы, чувствительность, оценка надёжности.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Финансирование: публикация подготовлена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности РУДН «5-100» (получатель Д. В. Козырев, разработка имитационной модели). Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-07-00142 а «Разработка моделей и методов анализа надежности соединений в гетерогенных сетях 5G для концепции Интернета надежных вещей» (получатель Д. В. Козырев, проведение численного анализа).

Для цитирования: Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В. Программный комплекс имитационного моделирования и расчета стационарных вероятностей и оценки надежности резервированной системы с произвольными распределениями времени безотказной работы и ремонта её элементов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 553-562. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.553-562

© Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В., 2019



Software Tool for Simulation and Calculating Stationary Probabilities and Reliability of a Redundant System with Arbitrary Distributions of Uptime and Repair Time of its Elements

Hector G. K. Houankpo¹, Dmitry V. Kozyrev^{1,2}

¹ Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russia

* gibsonhouankpo@yahoo.fr

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia
65 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russia

Abstract

With the rapid development and proliferation of computer networks and information technologies, researchers are faced with new complex problems, both applied and theoretical, of studying the reliability and availability of networks and data transmission systems. One of them is the reliability study of redundant data transmission systems between devices. One of the main conditions for the stable functioning of the data transmission systems is the insensitivity of their quality and effectiveness to changes in the initial parameters of the model. The analysis of such sensitivity, which is supposed to be carried out as part of this work, is one of the new directions in the research of the next-generation data transmission networks.

We consider the simulation model of the repairable data transmission system as a model of a closed homogeneous cold standby system with one repair unit with arbitrary distribution functions of uptime and repair time of its elements.

In this paper, we study the system-level reliability using the simulation approach. Also, we obtained the values of the relative recovery speed at which the desired level of reliability is achieved, presented plots of the system failure probability and plots of the uniform difference of the obtained simulation results against the relative speed of recovery. The simulation algorithm was implemented based on the R language.

Keywords: Simulation, reliability of redundant systems, relative recovery rate, probability of failure-free system operation, sensitivity, reliability assessment.

Funding: This publication was prepared with the support of the RUDN University Competitiveness Enhancement Program 5-100 (recipient D. V. Kozyrev, development of a simulation model). The study was conducted with financial support from the Russian Foundation for Basic Research as part of scientific project No. 17-07-00142 a "Development of Models and Methods for Analyzing the Reliability of Connections in 5G Heterogeneous Networks for the Concept of the Internet of Reliable Things" (recipient D. V. Kozyrev, numerical analysis).

For citation: Houankpo H.G.K., Kozyrev D. V. Software tool for simulation and calculating stationary probabilities and reliability of a redundant system with arbitrary distributions of uptime and repair time of its elements. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(3):553-562. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.553-562



Введение и мотивация

В настоящее время имитационное моделирование эффективно применяется для задач моделирования сетевых информационных систем, разработки математических методов, информационных технологий, включая разработку новых моделей вычислений, для анализа функционирования компьютерных сетей, моделирования телетрафика и т.д.

В последнее время функционирование различных аспектов современного общества стало критически зависеть от сетей связи [2,3]. С миграцией критически важных объектов в сети связи стало жизненно важным обеспечить высокую надежность и доступность сетей и систем передачи данных. Ряд предыдущих исследований [4-10] был сфокусирован на анализе надежности различных сложных телекоммуникационных систем. В частности, было проведено исследование надежности резервированных систем передачи данных в холодном режиме.

В [11] было рассмотрено создание имитационных моделей и средств для поддержки автоматизированного проектирования высоконадежных распределенных компьютерных систем. В [12] был представлен анализ надежности комбинированной электростанции, работающей на газотурбинном двигателе. Целью работы [13] была разработка модели для изучения надежности системы и анализа чувствительности доступности системы. В [14] был рассмотрен метод имитационного моделирования для моделирования надежности выполнения задания сложной системой посредством моделирования циклограммы задания, моделирования профиля среды и метода динамического моделирования надежности. В [15] были представлены методы моделирования и оценки, позволяющие проводить температурную оптимизацию надежности многопроцессорной системы на кристалле для конкретных приложений. В [16-25] также были рассмотрены различные подходы к моделированию и анализу надежности сложных систем.

В текущей работе обобщаются результаты предыдущих исследований авторов на случай холодного резервирования системы $\langle GI_n / GI / 1 \rangle$ с произвольной функцией распределения (ФР) времени безотказной работы (в.б.р.) и произвольной ФР времени ремонта её элементов. Целью работы является проведение имитационного моделирования для нахождения значения коэффициента ρ (относительная скорость восстановления), при котором достигается заданный уровень надежности и построение графиков зависимости вероятности безотказной работы системы от относительной скорости восстановления; приводятся результаты вычисления оценки надежности для разных исходных распределений.

Описание модели и постановка задачи

В качестве имитационной модели резервированной системы передачи данных, состоящей из n разнотипных каналов передачи данных, рассмотрим восстанавливаемую систему многократного холодного резервирования $\langle GI_n / GI / 1 \rangle$ с одним ремонтным устройством, с произвольным законом распределения в.б.р. её элементов и произвольным законом распределения времени их ремонта.

В данной работе будет рассмотрена зависимость вероятности безотказной работы системы $\langle GI_n / GI / 1 \rangle$ от относительной скорости восстановления. Ставится задача нахождения стационарной вероятности безотказной работы системы

для некоторых частных случаев распределений и оценка надежности системы, при $n = 3$.

Модель расчета стационарных вероятностей состояний системы $\langle GI_n / GI / 1 \rangle$

Определим следующие состояния моделируемой системы:

- состояние 0: один (главный) элемент работает, $(N-1)$ – в холодном резерве;
- состояние 1: один элемент отказал и находится в ремонте, один – работает, $(N-2)$ в холодном резерве;
- состояние 2: два элемента отказали, один находится в ремонте, второй ждёт своей очереди на ремонт, один – работает, $(N-3)$ – в холодном резерве;
- состояние N -: все элементы отказали, один находится в ремонте, остальные ждут своей очереди на ремонт.
- Для описания алгоритма моделирования надёжности системы $\langle GI_n / GI / 1 \rangle$ введём следующие переменные:
- double t – часы модельного времени, меняются при отказе или восстановлении элементов системы;
- int i, j – переменные состояния системы; при наступлении события осуществляется переход из i в j ;
- double $t_{nextfail}$ – служебная переменная, в которой хранится время до следующего отказа элемента;
- double $t_{nextrepair}$ – служебная переменная, в которой хранится время до следующего окончания ремонта отказавшего элемента;
- int k - счетчик числа итераций основного цикла.

Для наглядности имитационная модель представлена графически на рисунке 1 в виде блок-схемы. Критерием окончания основного цикла модели является достижение максимального модельного времени выполнения T .

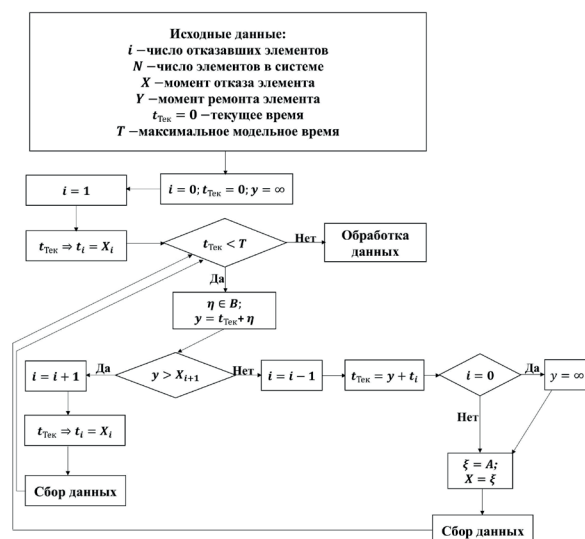


Рис. 1. Блок-схема имитационной модели для оценки стационарных вероятностей

Fig. 1. Block diagram of a simulation model to assess the stationary probabilities



Для лучшего понимания и воспроизводимости имитационной модели помимо блок-схемы также приводится алгоритм дискретно-событийного процесса имитационного моделирования в виде псевдокода с комментариями (Алгоритм 1).

Алгоритм 1. Псевдокод процесса имитационного моделирования системы $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$

Ввод: a1, b1, N, T, NG, "GI".

a1 - Среднее время между отказами элементов,

b1 - Среднее время ремонта,

N - Число элементов в системе,

T - Максимальное модельное время прогона,

NG - Число графиков траекторий,

"GI" - Функция распределения.

Вывод: стационарные вероятности состояний $P_0, P_1, P_2, \dots, P_N$.

Begin

array $r[\] := [0, 0, 0]$; // многомерный массив, содержащий результаты, k-го шага основного цикла

double $t := 0.0$; // инициализация часов модельного времени

int $i := 0; j := 0$; // переменные состояния системы

double $t_{nextfail} := 0.0$; // переменная, в которой хранится время до следующего отказа элемента

double $t_{nextrepair} := 0.0$; // переменная, в которой хранится время до следующего окончания ремонта

int $k := 1$; // счетчик числа итераций основного цикла

$s := rf_GI(\lambda_i)$; // генерация произвольной случайной величины s - время до первого события (отказа)

$ss := rf_GI(\delta(x))$; // генерация произвольной случайной величины ss - время ремонта отказавшего элемента)

$t_{nextfail} := t + s$;

$t_{nextrepair} := t + ss$;

while $t < \infty$ **do**

if $i = 0$ **then**

$t_{nextrepair} := \infty; j := j + 1; t := t_{nextfail}$;

else for ($vin1 : (N - 1)$)

if $i = v$ **then**

$s_1 := rf_GI(\lambda_i); s_2 := rf_GI(\delta(x))$;

$t_{nextfail} := t + s_1; t_{nextrepair} := t + s_2$;

if $t_{nextfail} < t_{nextrepair}$ **then**

$j := j + 1; t := t_{nextfail}$;

else $j := j - 1; t := t_{nextrepair}$;

end

else $i = N; t_{nextfail} := \infty; j := j - 1; t := t_{nextrepair}$;

end

if $t > T$ **then**

$t = T$

end do

$r[\ , k] := [t, i, j]; i := j; k := k + 1$;

end do

Оценка длительности пребывания в каждом состоянии $i, i = 0, 1, 2, \dots, N$; вычисление стационарных вероятностей

$\hat{p}_i = \frac{1}{NG} \sum_{j=1}^{NG}$ (длительность пребывания в состоянии i/T),

end

Алгоритм 1 был программно реализован на языке R.

В Таблице 1 приведены значения коэффициента $\rho = \frac{a_1}{b_1}$

относительной скорости восстановления (отношение среднего времени безотказной работы (в.б.р.) основного элемента к среднему времени ремонта отказавшего элемента), при котором достигается заданный уровень стационарной надёжности $1 - \pi_3 = \{0.9; 0.99; 0.999\}$. Для анализа и сравнения результатов были выбраны следующие распределения: Экспоненциальное (M), Вейбулла-Гнеденко (WB), Логнормальное (LN).

Рассмотрим частные случаи модели при $\rho = 25; N = 3; NG = 100; T = 1000$; где $\rho = \frac{a_1}{b_1}$ и $b_1 = 1$;

T_1 - время безотказной работы системы; T_2 - время ремонта отказавшего элемента

Таблица 1. Значения относительной скорости восстановления, при которых достигается заданный уровень стационарной надёжности

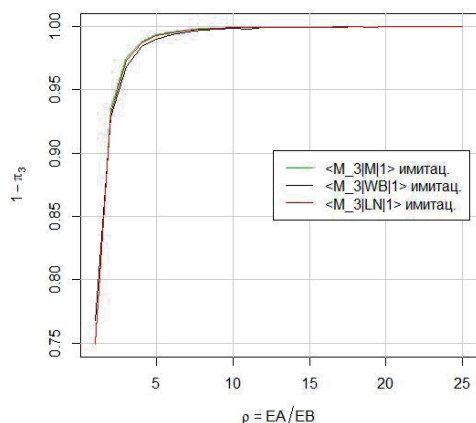
Table 1. Relative recovery rate values at which a given level of stationary reliability is achieved

$T_1 \backslash T_2$	$M(1/a_1)$			$WB(0.5)$			$LN(1)$		
	0.9	0.99	0.999	0.9	0.99	0.999	0.9	0.99	0.999
$M(1/b_1)$	1.6	4.2	9.1	1.5	4.7	11.3	1.6	4.4	9.7
$WB(0.5)$	3.2	12.2	>25	2.9	11.6	>25	3.3	11.9	>25
$LN(1)$	1.6	3.9	7.6	1.6	4.5	9.7	1.6	4	7.2

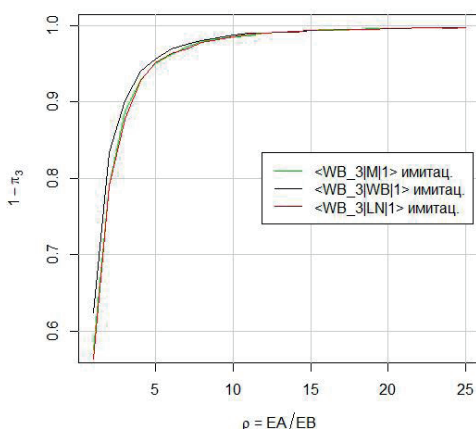
Достаточно высокий уровень надежности системы достигается при сравнительно небольшом превышении средних значений в.б.р. к времени ремонта кроме случая, когда время безотказной работы элементов системы распределено по закону Вейбулла-Гнеденко.

Рисунки 2, 3, 4 представлены графики вероятности безотказной работы системы; а на рисунке 5 графики равномерной разности результатов имитационной модели.

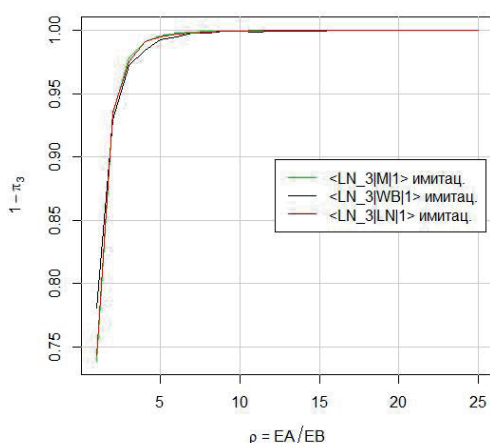




Р и с. 2. Графики зависимости вероятности безотказной работы системы $\langle M_N / GI / 1 \rangle$ от относительной скорости восстановления
F i g. 2. The plot of the system uptime probability $\langle M_N / GI / 1 \rangle$ versus the relative recovery rate

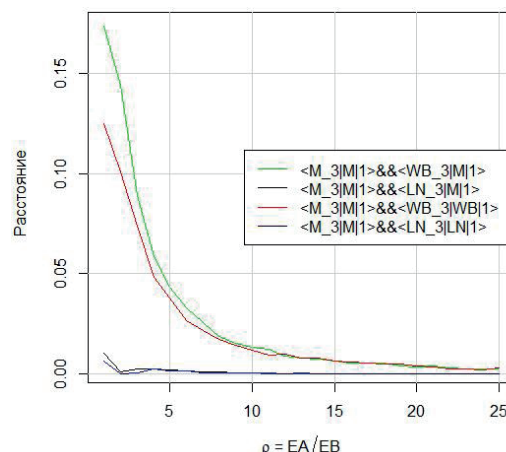


Р и с. 3. Графики зависимости вероятности безотказной работы системы $\langle WB_N / GI / 1 \rangle$ от относительной скорости восстановления
F i g. 3. The plot of the system uptime probability $\langle WB_N / GI / 1 \rangle$ versus the relative recovery rate



Р и с. 4. Графики зависимости вероятности безотказной работы системы $\langle LN_N \square GI / 1 \rangle$ от относительной скорости восстановления
F i g. 4. The plot of the system uptime probability $\langle LN_N \square GI / 1 \rangle$ versus the relative recovery rate

Полученные результаты демонстрируют высокую асимптотическую нечувствительность стационарной надежности системы. Видно, что различия между кривыми при «быстром» восстановлении становятся исчезающе малыми для всех рассматриваемых распределений времени ремонта элементов системы. Например, уже начиная со значения $\rho = 10$ все кривые почти неотличимы.



Р и с. 5. Графики равномерной разности результатов имитационной модели в зависимости от ρ

F i g. 5. The plot of the uniform difference in simulation model results versus the ρ

Графические результаты из Рис. 5 показывают, что равномерная разность между моделью $\langle M_3 / M / 1 \rangle$, $\langle M_N / LN / 1 \rangle$ и $\langle LN_N / LN / 1 \rangle$ стремится к нулю с ростом ρ .

Модель расчета для оценки надёжности системы $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$

Определим следующие состояния моделируемой системы:

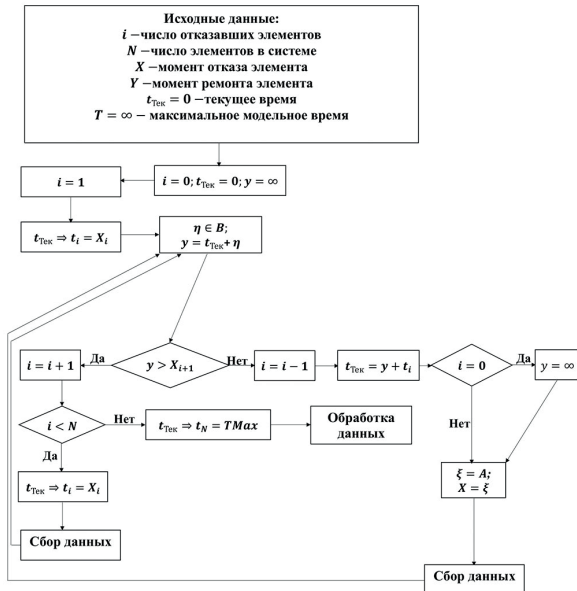
- состояние 0: один (главный) элемент работает, $(N - 1)$ – в холодном резерве;
- состояние 1: один элемент отказал и находится в ремонте, один – работает, $(N - 2)$ – в холодном резерве;
- состояние 2: два элемента отказали, один находится в ремонте, второй ждёт его очереди на ремонт, один – работает, $(N - 3)$ – в холодном резерве;
- состояние N –: все элементы отказали, то есть система останавливается.

Для описания алгоритма моделирования оценки надёжности системы $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$ потребуются следующие переменные:

- double t – часы модельного времени, меняются при отказе или восстановлении элементов системы;
- int i, j – переменные состояния системы; при наступлении события осуществляется переход из i , в j ;
- double $t_{nextfail}$ – служебная переменная, в которой хранится время до следующего отказа элемента;
- double $t_{nextrepair}$ – служебная переменная, в которой хранится время до следующего окончания ремонта отказавшего элемента;
- int k – счетчик числа итераций основного цикла.



Для наглядности имитационная модель представлена графически на рисунке 6 в виде блок-схемы.



Р и с. 6. Блок-схема имитационной модели для оценки надёжности системы
Fig. 6. Block diagram of a simulation model to assess the system reliability

Алгоритм 1. Псевдокод процесса имитационного моделирования системы $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$

Ввод: a1, b1, N, NG, "GI".

a1 - Среднее время между отказами элементов,

b1 - Среднее время ремонта,

N - Число элементов в системе,

NG - Число Графиков траекторий,

"GI" - функция распределения.

Вывод: Оценка надёжности системы \widehat{ET}

Begin

array $r[\] := [0, 0, 0]$; // многомерный массив, содержащий результаты, k-го шага основного цикла

double $t := 0.0$; // инициализация часов модельного времени

int $i := 0; j := 0$; // переменные состояния системы

double $t_{nextfail} := 0.0$; // переменная, в которой хранится время до следующего отказа элемента

double $t_{nextrepair} := 0.0$; // переменная, в которой хранится время до следующего окончания ремонта

int $k := 1$; // счетчик числа итераций основного цикла

$s := rf_GI(\lambda_i)$; // генерация произвольной случайной величины s - время до первого события (отказа)

$ss := rf_GI(\delta(x))$; // генерация произвольной случайной величины ss - время ремонта отказавшего элемента)

$t_{nextfail} := t + s$;

$t_{nextrepair} := t + ss$;

while $t < \infty$ **do**

if $i = 0$ **then**

$t_{nextrepair} := \infty; j := j + 1; t := t_{nextfail}$;

else for ($vin1 : (N - 1)$)

if $i = v$ **then**

$s_1 := rf_GI(\lambda_i); s_2 := rf_GI(" \delta(x) ")$;

$t_{nextfail} := t + s_1; t_{nextrepair} := t + s_2$;

if $t_{nextfail} < t_{nextrepair}$ **then**

$j := j + 1; t := t_{nextfail}$;

else $:= j - 1; t := t_{nextrepair}$;

end

else $i = N$; **then Break**;

end

end

$r[\ , k] := [t, i, j]; i := j; k := k + 1$;

end do

Оценка длительности пребывания в каждом состоянии $i, i = 0, 1, 2, \dots, N$; оценка надёжности

$$\widehat{ET} = \frac{1}{NG} \sum_{i=1}^{NG} (\text{длительность пребывания в состоянии } N) i$$

End.

Алгоритм 2 был программно реализован на языке R.

В Таблице 2 приведены значения оценки надёжности системы (оценки среднего в.б.р. системы) с временем, затраченным на моделирование. Для анализа и сравнения результатов были выбраны следующие распределения: Экспоненциальное (M), Вейбулла-Гнеденко (WB), и Логнормальное (LN). Однако разработанная имитационная модель не ограничена выбором распределений.

Рассмотрим частные случаи модели при $a_1 = 25; b_1 = 1; N = 3; NG = 10000$; T_1 - Время безотказной работы системы; T_2 - Время ремонта отказавшего элемента.

Таблица 2. Значения оценки надёжности системы $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$
Table 2. System Reliability Assessment Values $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$

$T_1 \backslash T_2$	$M(1/a_1)$	$WB(0.5)$	$LN(1)$
$M(1/b_1)$	16530.34	19566.77	25.18033
$WB(0.5)$	28.57675	927.8087	564.099
$LN(1)$	249458.5	71212.42	190780.8

Как видно из таблицы, самой надёжной моделью является модель с логнормальным распределением времени безотказной работы и показательным распределением времени ремонта отказавшего элемента.



Заключение

Для восстанавливаемой системы $\langle GI_N / GI / 1 \rangle$ холодного резервирования с одним восстанавливающим элементом, с произвольной ФР в.б.р. её элементов и произвольным законом распределения времени их ремонта были получены методом имитационного моделирования уровень надежности системы достигается при сравнительно небольшом превышении средних значений в.б.р. к времени ремонта и Графические и численные результаты показывают высокую асимптотическую нечувствительность стационарной надежности системы. Различия между кривыми при «быстром» восстановлении становятся исчезающе малыми для всех рассматриваемых распределений. Было показано, что самой надежной моделью является модель с логнормальным распределением времени безотказной работы и экспоненциальным распределением времени ремонта отказавшего элемента.

Список сокращений

ФР – функция распределения
в.б.р. – время безотказной работы

Список использованных источников

- [1] Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В. Аналитическое и имитационное моделирование надежности замкнутой однородной системы с произвольным числом источников данных и ограниченными ресурсами для их обработки // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 3. С. 552-559. DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.552-559
- [2] Ahmed W, Hasan O, Pervez U, Qadir J. Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks // Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 78. Pp. 191-215. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.11.008
- [3] Ometov A., Kozyrev D. V., Rykov V. V., Andreev S., Gaidamaka Y. V., Koucheryavy Y. Reliability-Centric Analysis of Offloaded Computation in Cooperative Wearable Applications // Wireless Communications and Mobile Computing. 2017. Vol. 2017. Article ID 9625687, 15 pages. DOI: 10.1155/2017/9625687
- [4] Rykov V. V., Kozyrev D. V., Zaripova E. Modeling and Simulation of Reliability Function of a Homogeneous Hot Double Redundant Repairable System // Proceedings of the 31st European Conference on Modelling and Simulation ECMS2017 (May 23-26, 2017, Budapest, Hungary) / Z. Z. Paprika, P. Hora'k, K. Va'radi, P. T. Zwierczyk, 'A. Vidovics-Dancs, J. P. R'adics (eds.). Germany, Digitaldruck Pirrot GmbH., 2017. Pp. 701-705. DOI: 10.7148/2017-0701
- [5] Houankpo H. G. K., Kozyrev D. V. Sensitivity Analysis of Steady State Reliability Characteristics of a Repairable Cold Standby Data Transmission System to the Shapes of Lifetime and Repair Time Distributions of its Elements // CEUR Workshop Proceedings. 2017. Vol. 1995. Pp. 107-113. Selected Papers of the VII Conference "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems", Moscow, Russia, 24-Apr-2017 / K. E. Samouilov, L. A. Sevastianov, D. S. Kulyabov (eds.). URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1995/paper-15-970.pdf> (дата обращения: 26.07.2019).
- [6] Рыков В. В., Чан А. Н. О чувствительности характеристик надежности систем к виду функций распределения времени безотказной работы и восстановления их элементов // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2014. № 3. С. 65-77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21757061> (дата обращения: 26.07.2019).
- [7] Efrosinin D., Rykov V. Sensitivity Analysis of Reliability Characteristics to the Shape of the Life and Repair Time Distributions // Information Technologies and Mathematical Modelling. ITMM 2014. Communications in Computer and Information Science. Vol. 487 / A. Dudin, A. Nazarov, R. Yakupov, A. Gortsev A. (eds). Springer, Cham, 2014. Pp. 101-112. DOI: 10.1007/978-3-319-13671-4_13
- [8] Efrosinin D., Rykov V. V., Vishnevskiy V. On Sensitivity of Reliability Models to the Shape of Life and Repair Time Distributions // 2014 Ninth International Conference on Availability, Reliability and Security. Fribourg, 2014. Pp. 430-437. DOI: 10.1109/ARES.2014.65
- [9] Rykov V. V., Kozyrev D. V. Analysis of Renewable Reliability Systems by Markovization Method // Analytical and Computational Methods in Probability Theory. ACMPT 2017. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10684 / V. V. Rykov, N. Singpurwalla, A. Zubkov (eds). Springer, Cham, 2017. Pp. 210-220. DOI: 10.1007/978-3-319-71504-9_19
- [10] Rykov V. V., Kozyrev D. On Sensitivity of Steady-State Probabilities of a Cold Redundant System to the Shapes of Life and Repair Time Distributions of Its Elements // Statistics and Simulation. IWS 2015. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. Vol. 231 / J. Pilz, D. Rasch, V. Melas, K. Moder K. (eds). Springer, Cham, 2018. Pp. 391-402. DOI: 10.1007/978-3-319-76035-3_28
- [11] Parshutina S. A., Bogatyrev V. A. Models to support design of highly reliable distributed computer systems with redundant processes of data transmission and handling // 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). St. Petersburg, 2017. Pp. 96-99. DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085772
- [12] Lisnianski A., Laredo D., Haim H. B. Multi-state Markov Model for Reliability Analysis of a Combined Cycle Gas Turbine Power Plant // 2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO). Beer-Sheva, 2016. Pp. 131-135. DOI: 10.1109/SMRLO.2016.31
- [13] Tourgoutian B., Yanushkevich A., Marshall R. Reliability and availability model of offshore and onshore VSC-HVDC transmission systems // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, 2015. Pp. 1-8. DOI: 10.1049/cp.2015.0101
- [14] Cao J., Wang Q., Shen Y. Research on modeling method of complex system mission reliability simulation // 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Chengdu, 2012. Pp. 307-311. DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2012.6246242
- [15] Gu Z., Zhu C., Shang L., Dick R. Application-Specific MPSoC Reliability Optimization // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2008. Vol. 16, No. 5. Pp. 603-608. DOI: 10.1109/TVLSI.2008.917574



- [16] Huang W, Loman J., Song T. Reliability modeling of A warm standby redundancy configuration with active \rightarrow standby \rightarrow active units // 2014 Reliability and Maintainability Symposium. Colorado Springs, CO, 2014. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/RAMS.2014.6798473
- [17] Korolyuk V. S., Korolyuk D. Heuristic principles of phase merging in reliability analysis // Reliability: Theory and Applications. 2017. Vol. 12, No. 1. Pp. 66-71. URL: http://www.gnedenko.net/Journal/2017/012017/RTA_1_2017-07.pdf (дата обращения: 26.07.2019).
- [18] Гнеденко Б. В. О дублировании с восстановлением // «Известия АН СССР». Техническая кибернетика. 1964. № 5. С. 111-118.
- [19] Rykov V. Multidimensional Alternative Processes Reliability Models // Modern Probabilistic Methods for Analysis of Telecommunication Networks. BWWQT 2013. Communications in Computer and Information Science. Vol. 356 / A. Dudin, V. Klimenok, G. Tsarenkov, S. Dudin (eds). Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Pp. 147-156. DOI: 10.1007/978-3-642-35980-4_17
- [20] Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. 4-е изд. М. Л.: ГИТТЛ, 1952. 232 с.
- [21] Гнеденко Б. В. О ненагруженном дублировании // «Известия АН СССР». Техническая кибернетика. 1964. № 4. С. 3-12.
- [22] Соловьев А. Д. Резервирование с быстрым восстановлением // «Известия АН СССР». Техническая кибернетика. 1970. № 1. С. 56-71.
- [23] Гнеденко Д. Б., Соловьев А. Д. Оценка надежности сложных восстанавливаемых систем // «Известия АН СССР». Техническая кибернетика. 1975. № 3. С. 121-128.
- [24] Севастьянов Б. А. Эргодическая теорема для марковских процессов и ее приложение к телефонным системам с отказами // Теория вероятностей и ее применения. 1957. Т. 2, вып. 1. С. 106-116. URL: <http://www.mathnet.ru/links/570f74a0f6c43193969a963341108352/tpv4960.pdf> (дата обращения: 26.07.2019).
- [25] Kalashnikov V. V. Geometric Sums: Bounds for Rare Events with Applications: Risk Analysis, Reliability, Queueing // Mathematics and Its Applications. Vol. 413. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1997. 256 p. DOI: 10.1007/978-94-017-1693-2

Поступила 26.07.2019; принята в печать 18.08.2018;
опубликована онлайн 30.09.2019.

Об авторах:

Уанкпо Гектор Жибсон Кинманон, аспирант кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов (117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5725-0313>, gibsonhouankpo@yahoo.fr

Козырев Дмитрий Владимирович, доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов (117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6); Институт проблем управления им. В.А.

Трапезникова РАН (117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65), кандидат физико-математических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0538-8430>, kozyrev-dv@rudn.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Houankpo H.G.K., Kozyrev D.V. Analytical Modeling and Simulation of Reliability of a Closed Homogeneous System with an Arbitrary Number of Data Sources and Limited Resources for their Processing. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2018; 14(3):552-559. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.552-559
- [2] Ahmed W., Hasan O., Pervez U., Qadir J. Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017; 78:191-215. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jnca.2016.11.008
- [3] Ometov A., Kozyrev D.V., Rykov V.V., Andreev S., Gaidamaka Y.V., Koucheryavy Y. Reliability-Centric Analysis of Offloaded Computation in Cooperative Wearable Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2017; 2017:9625687,15pp.(InEng.)DOI:10.1155/2017/9625687
- [4] Rykov V.V., Kozyrev D.V., Zaripova E. Modeling and Simulation of Reliability Function of a Homogeneous Hot Double Redundant Repairable System. In: Paprika Z. Z., Hora'k P., Va'radi K., Zwierczyk P. T., Vidovics-Dancs 'A., R'adics J.P. (eds.). *Proceedings of the 31st European Conference on Modelling and Simulation ECMS2017* (May 23-26, 2017, Budapest, Hungary) Germany, Digitaldruck Pirrot GmbH., 2017, pp. 701-705. (In Eng.) DOI: 10.7148/2017-0701
- [5] Houankpo H.G.K., Kozyrev D.V. Sensitivity Analysis of Steady State Reliability Characteristics of a Repairable Cold Standby Data Transmission System to the Shapes of Lifetime and Repair Time Distributions of its Elements. In: Samouilov K.E, Sevastianov L.A., Kulyabov D.S. (eds.). *CEUR Workshop Proceedings*. 2017; 1995:107-113. Selected Papers of the VII Conference "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems", Moscow, Russia, 24-Apr-2017. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-1995/paper-15-970.pdf> (accessed 26.07.2019). (In Eng.)
- [6] Rykov V.V., Ngia T.A. On sensitivity of systems reliability characteristics to the shape of their elements life and repair time distributions. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series "Mathematics. Information sciences. Physics"*. 2014; 3:65-77. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21757061> (accessed 26.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Efosinin D., Rykov V. Sensitivity Analysis of Reliability Characteristics to the Shape of the Life and Repair Time Distributions. In: Dudin A., Nazarov A., Yakupov R., Gortsev A. (eds). *Information Technologies and Mathematical Modelling. ITMM 2014. Communications in Computer and Information Science*, vol. 487. Springer, Cham, 2014, pp. 101-112. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-319-13671-4_13
- [8] Efosinin D., Rykov V.V., Vishnevskiy V. On Sensitivity of Reliability Models to the Shape of Life and Repair Time



- Distributions. In: *2014 Ninth International Conference on Availability, Reliability and Security*. Fribourg, 2014, pp. 430-437. (In Eng.) DOI: 10.1109/ARES.2014.65
- [9] Rykov V.V., Kozyrev D.V. Analysis of Renewable Reliability Systems by Markovization Method. In: Rykov V., Singpurwalla N., Zubkov A. (eds). *Analytical and Computational Methods in Probability Theory. ACMPT 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10684. Springer, Cham, 2017, pp. 210-220. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-319-71504-9_19
- [10] Rykov V., Kozyrev D. On Sensitivity of Steady-State Probabilities of a Cold Redundant System to the Shapes of Life and Repair Time Distributions of Its Elements. In: Pilz J., Rasch D., Melas V., Moder K. (eds). *Statistics and Simulation. IWS 2015. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, vol. 231. Springer, Cham, 2018, pp. 391-402. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-319-76035-3_28
- [11] Parshutina S.A., Bogatyrev V.A. Models to support design of highly reliable distributed computer systems with redundant processes of data transmission and handling. In: *2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS)*. St. Petersburg, 2017, pp. 96-99. (In Eng.) DOI: 10.1109/ITMQIS.2017.8085772
- [12] Lisnianski A., Laredo D., Haim H. B. Multi-state Markov Model for Reliability Analysis of a Combined Cycle Gas Turbine Power Plant. In: *2016 Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO)*. Beer-Sheva, 2016, pp. 131-135. (In Eng.) DOI: 10.1109/SMRLO.2016.31
- [13] Tourgoutian B., Yanushkevich A., Marshall R. Reliability and availability model of offshore and onshore VSC-HVDC transmission systems. In: *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*. Birmingham, 2015, pp. 1-8. (In Eng.) DOI: 10.1049/cp.2015.0101
- [14] Cao J., Wang Q., Shen Y. Research on modeling method of complex system mission reliability simulation. In: *2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*. Chengdu, 2012, pp. 307-311. (In Eng.) DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2012.6246242
- [15] Gu Z., Zhu C., Shang L., Dick R. Application-Specific MPSoC Reliability Optimization. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2008; 16(5):603-608. (In Eng.) DOI: 10.1109/TVLSI.2008.917574
- [16] Huang W., Loman J., Song T. Reliability modeling of A warm standby redundancy configuration with active → standby → active units. In: *2014 Reliability and Maintainability Symposium*. Colorado Springs, CO, 2014, pp. 1-5. (In Eng.) DOI: 10.1109/RAMS.2014.6798473
- [17] Korolyuk V.S., Korolyuk D. Heuristic principles of phase merging in reliability analysis. *Reliability: Theory and Applications*. 2017; 12(1):66-71. Available at: http://www.gnedenko.net/Journal/2017/012017/RTA_1_2017-07.pdf (accessed 26.07.2019). (In Eng.)
- [18] Gnedenko B.V. On cold double redundant system with restoration. *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya Kibernetika*. 1964; 5:111-118. (In Russ.)
- [19] Rykov V. Multidimensional Alternative Processes Reliability Models. In: Dudin A., Klimenok V., Tsarenkov G., Dudin S. (eds). *Modern Probabilistic Methods for Analysis of Telecommunication Networks. BWWQT 2013. Communications in Computer and Information Science*, vol. 356. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 147-156. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-642-35980-4_17
- [20] Petrovsky I.G. *Lectures on the theory of ordinary differential equations*. Moscow, GITTL, 1952. 232 pp. (In Russ.)
- [21] Gnedenko B.V. On cold double redundant system. *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya Kibernetika*. 1964; 4:3-12. (In Russ.)
- [22] Solovov A.D. On reservation with quick restoration. *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya Kibernetika*. 1970; 1:56-71. (In Russ.)
- [23] Gnedenko D.B., Solovov A.D. Reliability evaluation of complex renewable systems. *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya Kibernetika*. 1975; 3:121-128. (In Russ.)
- [24] Sevast'yanov B.A. An Ergodic Theorem for Markov Processes and Its Application to Telephone Systems with Refusals. *Theory of Probability & its Applications*. 1957; 2(1):104-112. (In Eng.) DOI: 10.1137/1102005
- [25] Kalashnikov V.V. *Geometric Sums: Bounds for Rare Events with Applications: Risk Analysis, Reliability, Queueing, Mathematics and Its Applications*, vol. 413. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1997, 256 pp. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-94-017-1693-2

Submitted 26.07.2019; revised 18.08.2019;
published online 30.09.2019.

About the authors:

Hector G.K. Houankpo, Postgraduate Student of the Department of Applied Probability and Informatics, Faculty of Science, Peoples' Friendship University of Russia (6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5725-0313>, gibsonhouankpo@yahoo.fr

Dmitry V. Kozyrev, Associate Professor of the Department of Applied Probability and Informatics, Faculty of Science, Peoples' Friendship University of Russia (6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russia); V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS (65 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russia), Ph.D. (Phys.-Math.), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0538-8430>, kozyrev-dv@rudn.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

