

На правах рукописи

Уанкпо Гектор Жибсон Кинманон

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЗАМКНУТОЙ РЕЗЕРВИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ
ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ И ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ

Специальность 1.2.3 - Теоретическая информатика, кибернетика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

Кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса
Лумумбы».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры теории вероятностей и
кибербезопасности Российского университета
дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)
Козырев Дмитрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Нетес Виктор Александрович**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, профессор кафедры «Сети связи и
системы коммутации» федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
технический университет связи и информатики»
Моисеев Александр Николаевич
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой программной инженерии,
профессор кафедры теории вероятностей и
математической статистики института прикладной
математики и компьютерных наук, Национальный
исследовательский Томский государственный
университет (ТГУ)
Иткин Виктор Юрьевич
кандидат технических наук, доцент, ведущий
специалист ООО «Индасофт»

Защита состоится 22 ноября 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета ПДС 0200.006 на базе РУДН по адресу: г. Москва, ул.
Орджоникидзе, д. 3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке РУДН по адресу:
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 0200.006
канд. физ.-мат. наук, доц.

М. Н. Геворкян

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В последнее время функционирование различных аспектов современного общества стало критически зависеть от сетей связи. С переносом критически важных объектов в сети связи жизненно важно обеспечить надежность и доступность сетей и систем передачи данных. Многие эксперты в области стохастического моделирования информационных процессов и структур подчеркивают важность исследования надежности этих систем, поскольку качество информационно-коммуникационных услуг включает в себя такие важные аспекты, как доступность и сохраняемость услуг, которые напрямую зависят от надежности систем и сетей, реализующих возможность предоставления данных услуг¹. В. А. Нетес рассматривал² такую меру, как интервальная надежность для описания влияния надежности на доступность услуги и сохраняемость услуги одновременно, предложил метод ее расчета и использования для частного примера информационно-коммуникационной сети. А. Н. Моисеев и др. рассматривали³ модель колл-центра в виде многолинейной системы массового обслуживания с пуассоновским входящим потоком и неограниченной зоной ожидания. Было построено приближение стационарного распределения количества вызовов в системе с произвольной функцией распределения времени обслуживания. Авторы подчеркивают, что исследование моделей с непоказательным временем обслуживания обеспечивает решения для широкого класса математических моделей, делая результаты более адекватными для реальных систем.

Благодаря стремительному распространению информационных технологий, вызванному лавинообразным ростом новых требовательных к сетевым ресурсам сервисов, мобильные пользователи ожидают гораздо более высокий уровень обслуживания, чем когда-либо прежде. Это создает беспрецедентную нагрузку на существующие и новые сетевые инфраструктуры. Действительно, количество подключенных портативных устройств резко возросло за последнее десятилетие, и ожидается, что этот рост только продолжится с расширением линейки носимых устройств. Сегодняшний переход к технологиям мобильной связи следующего поколения (5G/6G) приносит с собой поразительное разнообразие интегрированных в

¹ Netes V. The Interval Reliability, its Usage and Calculation for Information and Communication Systems and Networks // 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Tampere, 2021, pp. 261–266.

² Netes V. A. A General Approach to Dependability Assessment of Intelligent Transport Systems // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. — 2022. — P. 1–4.

³ Nazarov A., Moiseev A., Moiseeva S. Mathematical Model of Call Center in the Form of Multi-Server Queueing System // Mathematics. 2021, 9(22): 2877.

информационную сеть устройств, таких как носимая электроника, очки дополненной и виртуальной реальности, беспилотные автомобили, и многое другое. Этот сдвиг парадигмы открывает большое разнообразие совершенно новых приложений и сценариев, которые требуют не только обычных ресурсов (например, полосы пропускания), но и накладывают другие новые важные ограничения, в первую очередь, по задержкам и надежности. Последнее связано с продолжающейся эволюцией существующей сетевой экосистемы, поскольку в ней происходит переход от обслуживания преимущественно H2H-приложений (human-to-human) к разнообразным сервисам связи межмашинного типа (MTC - machine-type communications). Перспективные мобильные коммуникационные системы следующих поколений должны будут не только справляться с все возрастающим объемом пользовательского трафика и возрастающей плотностью абонентских устройств, но и обеспечивать обслуживание более широкого круга автоматизированных приложений с новыми уникальными требованиями относительно их надежности, скорости, доступности и эффективности функционирования в новой экосистеме Интернета надежных вещей (Internet of Reliable Things - IoRT). Примерами областей применения этого быстро растущего множества приложений, требующих сверхвысокой надежности связи (Ultra-Reliable Communication - URC), являются интеллектуальные транспортные системы, системы умного дома, умного города, мониторинга объектов, системы безопасности на автодорогах, системы общественной безопасности и др. Сетевое оборудование должно легко взаимодействовать с несколькими различными программными платформами, в условиях постоянного обновления программного обеспечения. Кроме того, устройства могут подвергаться сильно меняющимся внешним воздействиям: резким тепловым колебаниям, жидкостям, влаге, вибрациям, ударам и т.п. Перечисленные особенности развития компьютерных сетей и систем передачи данных последующих поколений в экосистеме IoRT обуславливают возрастающую потребность в адекватных математических моделях и инструментах, позволяющих исследовать их производительность и надежность.

Расчет надежности и исследование чувствительности характеристик надежности систем является одним из основных направлений исследований в области надежности информационных процессов и структур. Понятие «чувствительность» трактуется по-разному в разных прикладных областях, но, в общем, под чувствительностью понимается изменчивость выходных данных модели при вариации её входных параметров, в частности вида и параметров функций распределения случайных величин, описывающих характеристики объекта исследований.

Отдельным направлением исследований является анализ чувствительности вероятностно-временных характеристик систем массового обслуживания (СМО). Здесь нельзя не отметить фундаментальную работу Б.А. Севастьянова, которая послужила импульсом к созданию теории чувствительности в области теории массового обслуживания, а также другие классические работы экспертов в области моделирования систем передачи информации и анализа чувствительности этих моделей – И. Н. Коваленко, В. В. Калашникова, В. А. Ивницкого, В. В. Рыкова и др. В серии работ^{4,5} А. С. Румянцева с соавторами проводился анализ чувствительности стационарных характеристик производительности многолинейных СМО к распределению времени обслуживания.

В теории надежности впервые проблемы анализа чувствительности обсуждались Б.В.Гнеденко для случая однородной восстанавливаемой системы облегченного дублирования с помощью методов теории восстановления. В.В.Рыковым для изучения сложных систем надежности использовался аппарат многомерных альтернирующих процессов.

Компьютерные и коммуникационные сети постоянно развиваются благодаря результатам решения теоретических и практических задач, направленных на повышение доступности и надежности сетей и систем передачи данных. Исследователи часто сталкиваются с разработкой и анализом сложных резервированных систем, многие из которых представляют собой резервированные системы типа k -из- n . В. Ю. Иткин и др. продемонстрировали⁶ возможности оценки надежности структур нефтегазовой отрасли с помощью математических моделей k -из- n систем.

Сегодня методы прикладной теории вероятностей, случайных процессов, математической статистики, стохастического анализа, теории массового обслуживания способствуют решению сложнейших задач, среди которых можно отметить проектирование современных сетей передачи информации. Решение этих проблем заключается в повышении доступности и надежности систем передачи данных, таких как сети беспроводной связи. Современные беспроводные сети достигнут замечательного уровня производительности и эффективности в ближайшие годы благодаря развитию

⁴ Morozov E., Pagano M., Peshkova I., Rumyantsev A. Sensitivity Analysis and Simulation of a Multiserver Queueing System with Mixed Service Time Distribution // Mathematics. 2020. 8(8): 1277.

⁵ Morozov, E.; Peshkova, I.; Rumyantsev, A. On Failure Rate Comparison of Finite Multiserver Systems. In Distributed Computer and Communication Networks; Springer, 2019; LNCS, Volume 11965, pp. 419–431.

⁶ Rykov V., Itkin V., Sukharev M. Investigations of the Potential Application of k -out-of- n Systems in Oil and Gas Industry Objects // Journal of Marine Science and Engineering. 2020; 8(11):928.

новых математических моделей. Одним из направлений создания сверхскоростной и надежной беспроводной связи в рамках развития сетей будущего поколения является разработка гибридных резервированных систем на основе лазерных и радио-технологий, каждая из которых чувствительна к определенным условиям окружающей среды. Одним из основных условий стабильной работы системы передачи данных является нечувствительность показателей надежности и эффективности системы к изменению исходных параметров модели. Анализ такой чувствительности, проведенный в рамках данного исследования, является одним из новых направлений исследований высоконадежных систем передачи данных нового поколения и расширяет предыдущие исследования в этой области.

Помимо аналитического моделирования 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.

Степень разработанности темы. Для исследования надежности резервированной системы передачи данных в диссертационной работе проведен обзор результатов, полученных ранее, в области применения методов математического и имитационного моделирования. Анализ характеристик надежности исследуемых в диссертационной работе моделей резервированных систем проведен с помощью математического аппарата теории вероятностей, теории надёжности и теории случайных процессов. Среди работ, представленных в обзоре выше, следует особо отметить работы следующих российских и зарубежных ученых, внесших значимый вклад в создание теории и методов тематики исследований: Г. П. Башарин, Ю. К. Беляев, П. П. Бочаров, В. М. Вишневский, Ю. В. Гайдамака, И. Б. Герцбах, Б.В. Гнеденко, В. А. Ивницкий, В. Ю. Иткин, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко, Д. В. Козырев, А. Н. Моисеев, С. П. Моисеева, В. А. Нетес, А. С. Румянцев, В. В. Рыков, К. Е. Самуйлов, Б. А. Севастьянов, А. Д. Соловьёв, И. А. Ушаков, D. G. Kendall, A. Lisnianski, G. Levitin, K. Trivedi, S. Chakravarthy M. Xie, M. Zuo, и др.

Целью диссертационной работы является разработка моделей для анализа показателей надёжности замкнутой резервированной системы обслуживания с произвольным числом источников данных и ограниченными ресурсами для их обработки.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка и исследование комплекса аналитических моделей для анализа показателей надежности замкнутых резервированных систем обслуживания различной конфигурации и разного типа резерва.
2. Разработка алгоритмов дискретно-событийного имитационного моделирования и их реализация в виде комплекса имитационных моделей для анализа показателей надежности замкнутых резервированных систем обслуживания различной конфигурации и разного типа резерва в общем случае.
3. Анализ зависимости характеристик надежности резервированной системы от исходных параметров модели – вида функций распределения, коэффициента вариации, относительной скорости восстановления элементов системы.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная в виде замкнутой системы массового обслуживания с ограниченным числом источников заявок общая математическая модель для анализа характеристик надежности однородной системы n -кратного резервирования, с произвольной функцией распределения времени ремонта её элементов. Разработанная математическая модель для анализа характеристик надежности неоднородной дублированной системы.
2. Разработанный комплекс имитационных моделей для вычисления стационарных и нестационарных характеристик надежности однородной и неоднородной резервированных систем в случае, когда оба исходных распределения модели отличны от показательного.
3. Численный и графический анализ зависимости характеристик надёжности системы от параметров модели (типа резерва, значения коэффициента вариации времени ремонта, вида распределения времени ремонта, относительной скорости восстановления), проведённый с помощью разработанных аналитических и имитационных моделей.

Научная новизна:

1. Разработан комплекс новых аналитических моделей замкнутой резервированной системы обслуживания с произвольным числом элементов с разными типами резерва (горячее, холодное, облегчённое резервирование и резервирование типа k -из- n). Исследовано поведение системы при редких

отказах её элементов и выведены асимптотические выражения для вероятностей состояний системы.

2. Разработан новый комплекс программ имитационного моделирования для расчета характеристик надежности резервированной системы и анализа их зависимости от параметров модели в самом общем случае, когда как распределение времени безотказной работы, так и распределение времени ремонта отказавших элементов являются произвольными.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории вероятностей, теории случайных процессов, теории надежности, методы дискретно-событийного имитационного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическую значимость представляют разработанные в диссертации математические методы и вычислительные алгоритмы, предназначенные для исследования характеристик надежности резервированной системы передачи данных. Полученные теоретические результаты работы представляют практическую значимость, так как позволяют производить расчёт характеристик надёжности резервированной системы и оценку среднего времени жизни системы, в том числе для замкнутых однородных систем холодного, облегчённого и горячего резервирования, а также замкнутой неоднородной дублированной системы холодного резервирования.

Результаты работы включены в исследования по гранту РФФИ Аспиранты № 20-37-90137 «Исследование чувствительности характеристик надежности гибридных систем связи к виду функций распределения наработки на отказ и времени восстановления их элементов». Результаты работы также были использованы в реализованном в РУДН проекте «5-100» повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует содержанию специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика», а именно следующим пунктам паспорта специальности:

- п.9 «Математическая теория исследования операций»,
- п.12 «Модели информационных процессов и структур»,
- п.26 «Теория надёжности и безопасности использования информационных технологий».

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается их строгими доказательствами, а также подтверждается численными расчетами и вычислительным экспериментом. Результаты, полученные с помощью разработанного комплекса имитационных моделей, хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью аналитических моделей.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих всероссийских и международных научных конференциях и семинарах:

- XIX Международная научная конференция «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN-2016 (Москва, РУДН, 2016 г.);
- VII Всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» ИТТММ-2017 (Москва, РУДН, 2017 г.);
- VIII Всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» ИТТММ-2018 (Москва, РУДН, 2018 г.);
- XIII Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, МГУ, 2018 г.);
- IX Всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» ИТТММ-2019 (Москва, РУДН, 2019 г.);
- XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Prospects of Fundamental Sciences Development» (Томск, Россия, 2019 г.);
- XIV Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, МГУ, 2019 г.);
- XII Международный конгресс «International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops» (ICUMT-2020), (Брно, Чехия, 2020 г.)
- «XXX European Safety and Reliability Conference and XV Probabilistic Safety Assessment and Management Conference» (ESREL2020 PSAM15) (Венеция, Италия, 2020 г.)
- XV Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, МГУ, 2020 г.);

- XXIII Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN-2020 (Москва, РУДН, 2020 г.);
- XXIV Международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» DCCN-2021 (Москва, РУДН, 2021 г.);
- XVI Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, МГУ, 2021 г.).

Также по материалам диссертационного исследования в федеральной службе по интеллектуальной собственности зарегистрированы 4 программы для ЭВМ:

- № 2020610408 «Программа расчета средней наработки на отказ замкнутой однородной системы многократного холодного резервирования с произвольными исходными распределениями»
- № 2020610325 «Программа расчета стационарных вероятностей состояний замкнутой однородной системы многократного холодного резервирования с произвольным распределением времени ремонта и времени безотказной»
- № 2021660642 «Программа расчета вероятности безотказной работы замкнутой однородной системы многократного холодного резервирования с произвольными исходными распределениями»
- № 2021660643 «Программа расчета средней наработки на отказ замкнутой однородной системы многократного горячего резервирования с произвольными исходными распределениями»

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 18 печатных изданиях, в том числе в 8 изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus [1-8], 5 изданиях, рекомендованных ВАК РФ [9-13], 5 - в других рецензируемых научных изданиях. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в исследовании моделей и методов их исследования, доказательстве утверждений, разработке алгоритмов и программных средств для проведения численных расчетов, численном расчете и интерпретации полученных результатов. Программные

средства, используемые для численного и графического анализа, разработаны при непосредственном участии автора. Работа [9] выполнена без соавторов.

Объем и структура работы. В диссертации содержится введение, основная часть, состоящая из 3 глав, заключение, 6 приложений и библиографический список из 100 наименований. Диссертационная работа изложена на 127 страницах, содержит 31 таблицу, 38 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по данной тематике исследований, формулируются цель и задачи работы, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В главе 1 в качестве математической модели системы, состоящей из n однотипных каналов передачи данных с одним ремонтным устройством, рассмотрена модель замкнутой восстанавливаемой резервированной однородной системы холодного, горячего и облегченного резервирования с экспоненциальным законом распределения времени безотказной работы (в.б.р.) её элементов и произвольным законом распределения времени их ремонта. Рассматриваемая система обозначена в соответствии с обобщенной символикой Кендалла-Башарина⁷ как модель $\langle M_n / GI / 1 \rangle$, где угловые скобки означают, что это замкнутая система обслуживания с ограниченным числом источников заявок⁸, а символы M_n и GI (General Independent) на первом и втором местах означают показательное распределение в.б.р. компонентов системы и произвольное распределение времени их ремонта, соответственно. Единственное ремонтное устройство восстанавливает отказавшие элементы по одному с приоритетом по порядку отказа, то есть резервные отказавшие элементы ждут своей очереди на ремонт до завершения ремонта основного элемента.

В *разделе 1.1* для описания функционирования системы облегченного резервирования введен случайный процесс $\nu(t)$ – число отказавших элементов системы в момент времени t , заданный на множестве состояний $E = \{\overline{0, n}\}$. Для описания поведения

⁷ Kendall David G. Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain // Ann. Math. Statist. — 1953. — Vol. 24, no. 3. — Pp. 338–354.

⁸ Рыков В. В., Козырев Д. В. Основы теории массового обслуживания (Основной курс: марковские модели, методы марковизации). — М.: ИНФРА-М, 2015. — 223 с.

системы с помощью Марковского процесса (МП) и для вычисления её характеристик надежности использован метод введения дополнительных переменных. Построен двумерный случайный процесс $(v(t), x(t))$, с расширенным пространством состояний $\varepsilon = \{(0), (1, x), (2, x), \dots, (n, x)\}$, где в качестве дополнительной переменной введено $x(t) \in R_+$ – время, затраченное в момент t на ремонт отказавшего элемента.

Обозначим через $p_0(t)$ вероятность того, что в момент t система находится в состоянии $i=0$, и через $p_i(t, x)$ плотность распределения (ПР) вероятностей (по непрерывной компоненте) того, что в момент t система находится в состоянии $i = \overline{1, n}$, и время, затраченное на ремонт отказавшего элемента, находится в интервале $(x, x + dx)$,

$$p_0(t) = p\{v(t) = 0\},$$

$$p_i(t, x) dx = p\{v(t) = i, x < x(t) < x + dx\}, i = \overline{1, n}.$$

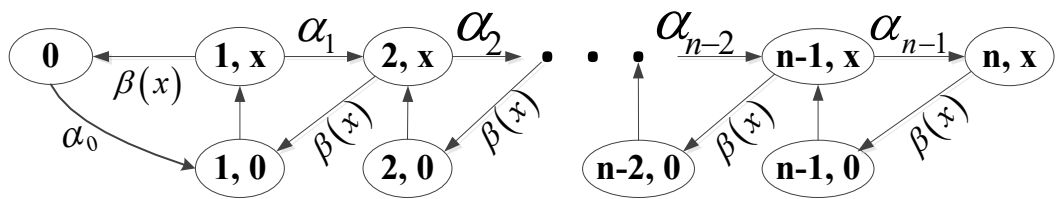


Рисунок 1. Граф интенсивности переходов для однородной системы облегченного резервирования

Введено обозначение $\alpha_i = \lambda + (n-1-i)\gamma$; $i = \overline{0, n-1}$; $0 < \gamma \leq \lambda$.

С помощью формулы полной вероятности выведена система дифференциальных уравнений Колмогорова, позволяющая найти вероятности состояний рассматриваемой системы, и найдено её решение методом вариации постоянной. Результат оформлен в виде теоремы 1, доказательство которой приводится в тексте диссертации.

Теорема 1. Стационарные вероятности состояний восстанавливаемой системы облегчённого резервирования $\langle M_n/GI/1 \rangle$ имеют вид:

$$p_0 = C_1 \frac{\tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_0},$$

$$p_1 = C_1 \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_1},$$

$$p_i = C_1 \left(\Phi_i \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_i)}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{i-1} (-1)^{i-j} \left(\prod_{k=j}^{i-1} \frac{\alpha_k}{\alpha_j - \alpha_{k+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j} \right); \quad i = \overline{2, n-1}; \quad n > 2, \quad ,$$

$$p_n = \begin{cases} C_1 \left(\Phi_n b - \Phi_{n-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{n-1})}{\alpha_{n-1}} \right); & n = 2 \\ C_1 \left(\Phi_n b - \Phi_{n-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{n-1})}{\alpha_{n-1}} + \sum_{j=1}^{n-2} (-1)^{n-j} \left(\prod_{k=j}^{n-2} \frac{\alpha_{k+1}}{\alpha_j - \alpha_{k+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j} \right); & n > 2 \end{cases},$$

где b - математическое ожидание с.в. времени ремонта отказавшего элемента.

Замечание: при вычислении стационарных вероятностей состояний системы p_i ; $i = \overline{0, n}$ и вероятности отказа системы p_n выбранные данные должны удовлетворять

$$\text{следующему условию: } \Phi_n b \geq \Phi_{n-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{n-1})}{\alpha_{n-1}} + \sum_{j=1}^{n-2} (-1)^{n-j} \left(\prod_{k=j}^{n-2} \frac{\alpha_{k+1}}{\alpha_j - \alpha_{k+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j}.$$

В разделе 1.2 рассмотрено поведение системы $\langle M_n/GI/1 \rangle$ при редких отказах её элементов и выведены асимптотические выражения для вероятностей состояний системы.

В разделе 1.3 предложена и исследована математическая модель однородной системы холодного резервирования. Составлена система дифференциальных уравнений для нахождения вероятностей состояний системы и найдено её решение методом вариации постоянной. Результат оформлен в виде теоремы 2, доказательство которой приводится в тексте диссертации.

Теорема 2. Стационарные вероятности состояний однородной восстанавливаемой системы холодного резервирования имеют вид:

$$p_0 = C_1 \frac{\tilde{b}(\lambda)}{\lambda}$$

$$p_i = C_1 \left(\sum_{j=1}^i \Phi_j \frac{\lambda^{i-j}}{(i-j)!} \Psi_{i-j} \right); \quad i = \overline{1, n-1}$$

$$p_n = C_1 \left(\Phi_n b - \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^j \Phi_k \frac{\lambda^{j-k}}{(j-k)!} \Psi_{j-k} \right)$$

или

$$p_n = C_1 \lambda^{-1} \left(\rho^{-1} \Phi_n - \lambda \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^j \Phi_k \frac{\lambda^{j-k}}{(j-k)!} \Psi_{j-k} \right),$$

$$\text{где } C_1 = \left(\frac{\tilde{b}(\lambda)}{\lambda} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^i \Phi_j \frac{\lambda^{i-j}}{(i-j)!} \Psi_{i-j} + \Phi_n b - \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^j \Phi_k \frac{\lambda^{j-k}}{(j-k)!} \Psi_{j-k} \right)^{-1},$$

b – математическое ожидание с.в. времени ремонта отказавшего элемента, $\Phi_1=1$ и

$$\Phi_n = \Phi_{n-1} (1 - \tilde{b}(\lambda)) - \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^j \Phi_k \frac{\lambda^{j-k}}{(j-k)!} \Psi_{j-k}, \text{ при } n = 2,$$

$$\Phi_2 = (1 - \tilde{b}(\lambda) - \lambda \psi_1) \frac{1}{\tilde{b}(\lambda)}, \text{ при } n > 2,$$

$$\Phi_n = \Phi_{n-1} + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^j \Phi_k \frac{\lambda^{j-k}}{(j-k)!} \Psi_{j-k}, \text{ при } n > 2,$$

$$\Phi_{i+1} = \left(\Phi_i - \sum_{j=1}^i \Phi_j \frac{\lambda^{i+1-j}}{(i+1-j)!} \Psi_{i+1-j} \right) \frac{1}{\tilde{b}(\lambda)}; \quad i = \overline{2, n-2}, \text{ при } n > 3,$$

$$\psi_i = \int_0^{\infty} x^i e^{-\lambda x} b(x) dx; \quad i = \overline{0, n},$$

$$\Psi_i = \int_0^{\infty} x^i e^{-\lambda x} (1 - B(x)) dx; \quad i = \overline{0, n}.$$

Замечание: при вычислении стационарных вероятностей состояний системы p_i ; $i = \overline{0, n}$, и вероятности отказа p_n , выбранные данные должны удовлетворять следующему условию: $\Phi_n b \geq \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^j \Phi_k \frac{\lambda^{j-k}}{(j-k)!} \Psi_{j-k}$.

В *разделе 1.4* предложена и исследована математическая модель надежности однородной системы горячего резервирования типа k -из- n . Получены следующие стационарные вероятности состояний системы:

$$p_0 = C_1 \frac{\tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_0},$$

$$p_1 = C_1 \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_1},$$

$$p_i = C_1 \left(\Phi_i \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_i)}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{i-1} (-1)^{i-j} \left(\prod_{m=j}^{i-1} \frac{\alpha_m}{\alpha_j - \alpha_{m+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j} \right); \quad i = \overline{2, k-1}; \quad k > 2,$$

$$p_k = \begin{cases} C_1 \left(\Phi_k b - \Phi_{k-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{k-1})}{\alpha_{k-1}} \right); & k = 2 \\ C_1 \left(\Phi_k b - \Phi_{k-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{k-1})}{\alpha_{k-1}} + \sum_{j=1}^{k-2} (-1)^{k-j} \left(\prod_{i=j}^{k-2} \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_j - \alpha_{i+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j} \right); & k > 2 \end{cases},$$

$$\text{где } C_1 = \left(\frac{\tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_0} + \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_1} + \Phi_k b - \Phi_{k-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{k-1})}{\alpha_{k-1}} \right)^{-1}; \quad k = 2,$$

$$C_1 = \left(\frac{\tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_0} + \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_1)}{\alpha_1} + \sum_{i=2}^{k-1} \left(\Phi_i \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_i)}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{i-1} (-1)^{i-j} \left(\prod_{m=j}^{i-1} \frac{\alpha_m}{\alpha_j - \alpha_{m+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j} \right) + \left(\Phi_k b - \Phi_{k-1} \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_{k-1})}{\alpha_{k-1}} + \sum_{j=1}^{k-2} (-1)^{k-j} \left(\prod_{i=j}^{k-2} \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_j - \alpha_{i+1}} \right) \Phi_j \frac{1 - \tilde{b}(\alpha_j)}{\alpha_j} \right) \right)^{-1}; \quad k > 2$$

где b – математическое ожидание с.в. времени ремонта отказавшего элемента,

$$\Phi_2 = \Phi_1 = 1; \quad k = 2,$$

$$\Phi_2 = \left(1 - \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \right) \tilde{b}(\alpha_1) \right) \frac{1}{\tilde{b}(\alpha_2)}; \quad k > 2,$$

$$\Phi_k = \Phi_{k-1} \left(1 + \tilde{b}(\alpha_{k-1}) \right) + \sum_{j=1}^{k-2} (-1)^{k-1-j} \left(\prod_{i=j}^{k-2} \frac{\alpha_i}{\alpha_j - \alpha_{i+1}} \right) \Phi_j - \sum_{j=1}^{k-2} (-1)^{k-j} \left(\prod_{i=j}^{k-2} \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_j - \alpha_{i+1}} \right) \Phi_j \tilde{b}(\alpha_j); \quad k > 2,$$

$$\Phi_{i+1} = \left(\Phi_i + \sum_{j=1}^{i-1} (-1)^{i-j} \left(\prod_{m=j}^{i-1} \frac{\alpha_m}{\alpha_j - \alpha_{m+1}} \right) \Phi_j - \sum_{j=1}^i (-1)^{i+1-j} \left(\prod_{m=j}^i \frac{\alpha_m}{\alpha_j - \alpha_{m+1}} \right) \Phi_j \tilde{b}(\alpha_j) \right) \frac{1}{\tilde{b}(\alpha_{i+1})}; \quad i = \overline{2, k-2}; \quad k > 3$$

В *разделе 1.5* рассмотрено обобщение аналитической модели системы, исследованной в подразделе 1.3., на случай, когда элементы системы не являются идентичными. Вычислены стационарные вероятности состояний восстанавливаемой замкнутой неоднородной системы холодного дублирования с одним ремонтным устройством, с двумя разнородными источниками данных с экспоненциальной функцией распределения времени безотказной работы и произвольной функцией распределения времени ремонта её элементов. Результат оформлен в виде теоремы 3, доказательство которой приводится в тексте диссертации.

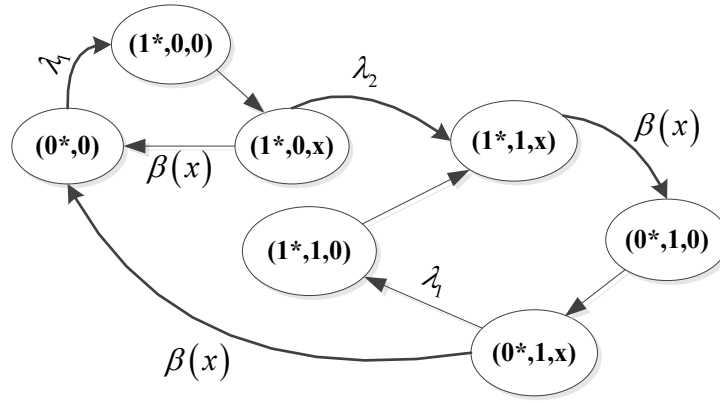


Рисунок 2. Граф интенсивностей переходов неоднородной системы холодного резервирования.

Теорема 3. Стационарные вероятности состояний неоднородной дублированной системы холодного резервирования имеют вид:

$$p_{0^*,0} = C_{1^*,0} \frac{1}{\lambda_1},$$

$$p_{1^*,0} = C_{1^*,0} \frac{1 - \tilde{b}(\lambda_2)}{\lambda_2},$$

$$p_{0^*,1} = C_{1^*,0} \frac{(1 - \tilde{b}(\lambda_2))(1 - \tilde{b}(\lambda_1))}{\tilde{b}(\lambda_1) \lambda_1},$$

$$p_{1^*,1} = C_{1^*,0} \left(\frac{(1 + (\tilde{b}(\lambda_1) - 1)\tilde{b}(\lambda_2))}{\tilde{b}(\lambda_1)} b - \frac{(1 - \tilde{b}(\lambda_2))}{\lambda_2} \right),$$

где

$$C_{1^*,0} = \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{(1 - \tilde{b}(\lambda_2))(1 - \tilde{b}(\lambda_1))}{\tilde{b}(\lambda_1) \lambda_1} + \frac{(1 + (\tilde{b}(\lambda_1) - 1)\tilde{b}(\lambda_2))}{\tilde{b}(\lambda_1)} b \right)^{-1}.$$

В главе 2 представлены разработанные алгоритмы имитационного моделирования на основе дискретно-событийного подхода для численного и графического анализа надежности резервированных систем разных типов резерва с произвольной функцией распределения времени безотказной работы и времени ремонта элементов. В подразделе 2.1.1 и 2.1.2 представлены, соответственно, алгоритм расчета стационарных вероятностей состояний системы и алгоритм расчета оценки среднего времени жизни системы холодного резервирования. Аналогично в подразделе 2.2.1 и 2.2.2 для системы типа k -из- n , а также в подразделе 2.3.1 и 2.3.2 для неоднородной дублированной системы холодного

резервирования приводятся разработанные алгоритмы имитационного моделирования для расчета стационарных вероятностей состояний, среднего времени жизни и функции надежности систем.

В главе 3 на основании аналитических и имитационных результатов, полученных в главах 1 и 2, проводится численный анализ зависимости характеристик надёжности системы от входных параметров модели: типа резерва, значения коэффициента вариации времени ремонта, вида распределения времени ремонта. Для численного и графического анализа и сравнения результатов были выбраны следующие распределения времени безотказной работы и времени ремонта элементов:

- Вейбулла-Гнеденко ($WG(\lambda, k)$), где коэффициент вариации $\chi = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/k)}{\Gamma(1+1/k)} - 1}$ и математическое ожидание $b = \lambda \cdot \Gamma(1 + 1/k)$. Далее можно найти коэффициент формы k и коэффициент масштаба λ с помощью статистического пакета программирования R;
- Парето ($PAR(x_m, \alpha)$), где коэффициент формы $\alpha = 1 + \sqrt{\frac{1}{\chi^2} + 1}$ и коэффициент масштаба $x_m = \frac{b \cdot (\alpha - 1)}{\alpha}$;
- Гамма ($G(\theta, k)$), где коэффициент формы $k = \frac{1}{\chi^2}$ и коэффициент масштаба $\theta = \frac{b}{k}$;
- Логнормальное ($LN(\mu, \sigma^2)$), где параметры $\sigma = \sqrt{\ln(\chi^2 + 1)}$ и $\mu = \ln(b) - \sigma^2/2$.

В разделе 3.1 и 3.2 проводится анализ стационарных характеристик надежности однородной резервированной системы типа $\langle M_n / GI/1 \rangle$ с помощью аналитического и имитационного моделирования, соответственно. Рассмотрены частные случаи $\langle M_n / WG/1 \rangle$; $\langle M_n / PAR/1 \rangle$; $\langle M_n / G/1 \rangle$ и $\langle M_n / LN/1 \rangle$ при $n=3$ с различными законами распределения времени ремонта отказавших элементов при разных значениях коэффициента вариации для разных типов резерва.

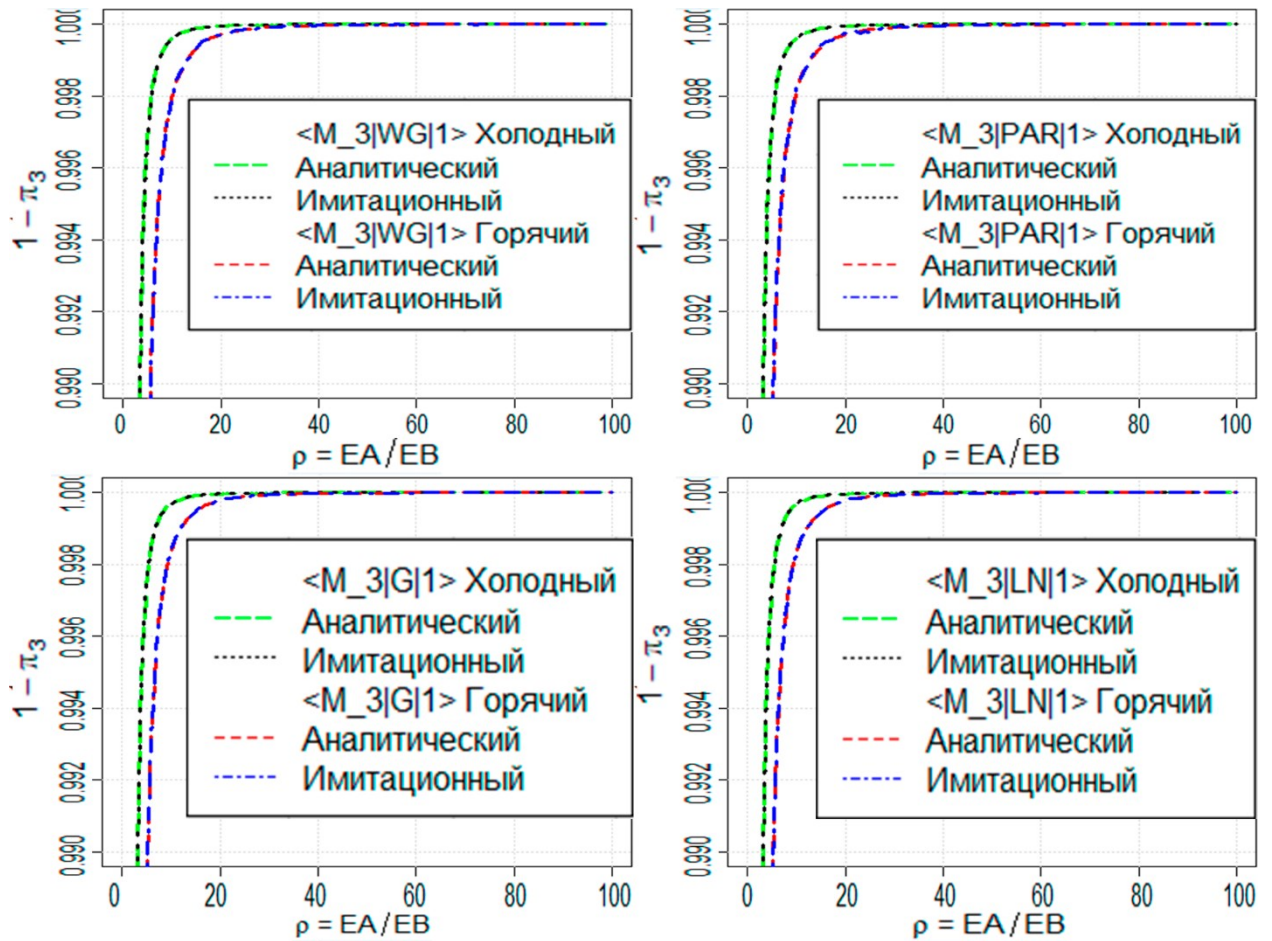


Рисунок 3. Графики зависимости стационарной вероятности безотказной работы системы $\langle M_3/GI/1 \rangle$ от относительной скорости восстановления ρ , построенные как по явным аналитическим выражениям, так и имитационно

Таблица 1. Относительная погрешность имитационного моделирования системы $\langle M_3/GI/1 \rangle$ холодного (ε_{B6P} -Хол.) и горячего (ε_{B6P} -Гор.) резервирования.

GI	M	WG	PAR	G	LN
ε_{B6P} -Хол.	6,8533E-06	6,6997E-07	1,1166E-05	6,0693E-06	1,1776E-05
ε_{B6P} -Гор.	5,6338E-06	1,0866E-05	2,2682E-05	1,5942E-05	6,5211E-07

В разделе 3.3 и 3.4 проводится анализ, соответственно, стационарных и нестационарных характеристик надежности однородной резервированной системы типа $\langle GI_n/GI/1 \rangle$ с помощью имитационного моделирования. В качестве примера рассмотрен случай $n=3$.

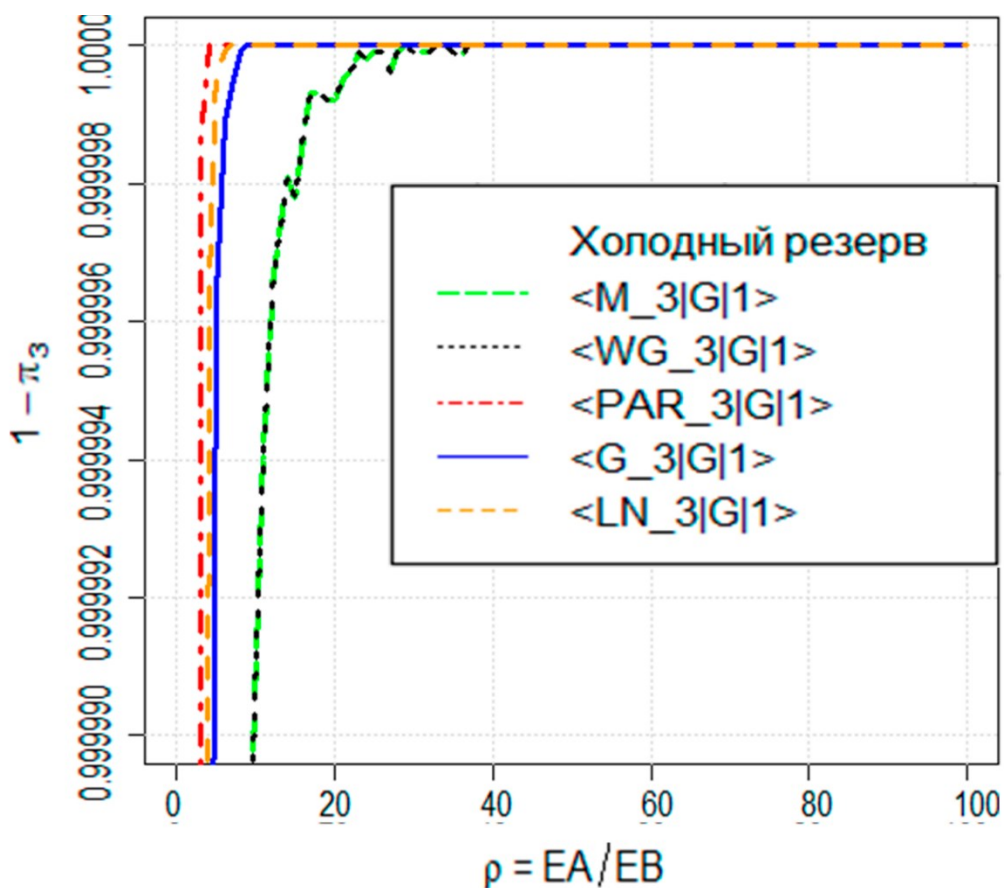


Рисунок 4. Графики зависимости вероятности безотказной работы системы $\langle G_3 / G | 1 \rangle$ от относительной скорости восстановления ρ

Таблица 2. Оценка среднего времени жизни системы $\langle G_3 / G | 1 \rangle$ холодного (Хол.) и горячего (Гор.) резервирования

T1 \ T2	M	WG	PAR	G	LN	
M	Хол.	22,72177	23,76881	27,91936	25,27162	23,00732
	Гор.	6,494617	7,161341	8,395532	7,107263	7,099581
WG	Хол.	38,40447	74,73501	87,83327	71,44818	87,27522
	Гор.	6,509034	7,01305	7,248571	6,710071	6,399708
PAR	Хол.	73,38551	698,156	426,0609	3400,311	982,4501
	Гор.	5,020196	5,16995	5,829005	5,403815	6,35952
G	Хол.	63,61766	131,2072	214,2496	207,8197	224,5246
	Гор.	4,18813	3,770588	3,795211	3,825651	3,808868
LN	Хол.	58,03609	230,4098	280,2592	385,979	286,5799
	Гор.	3,19705	3,216988	3,290699	3,235358	3,263019

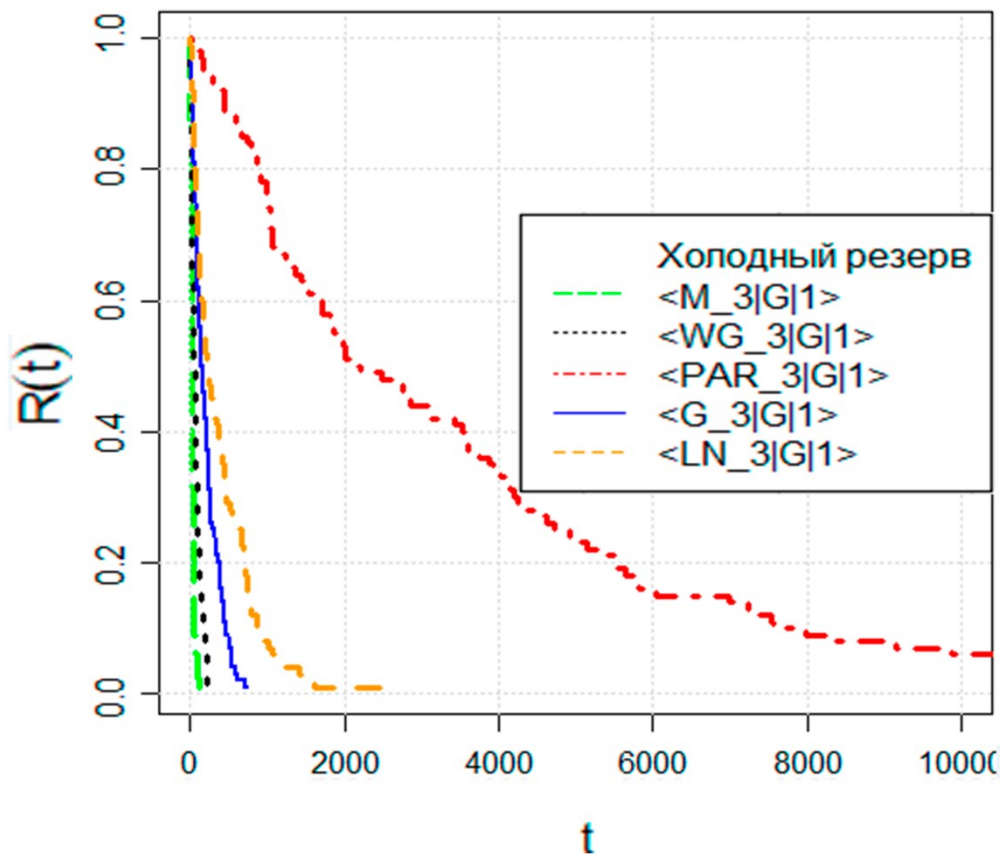


Рисунок 5. Графики функции надёжности $R^*(t)$ системы $\langle GI_3/G/1 \rangle$

В *разделе 3.5* рассмотрены частные случаи модели восстанавливаемой неоднородной системы холодного резервирования $\langle M_2/GI/1 \rangle$ и приведены полученные по аналитическим формулам из главы 1 значения стационарных вероятностей состояний системы при разных распределениях времени ремонта и значении коэффициента вариации $\chi=0,5$. Проводится сравнительный анализ результатов, полученных по асимптотическим выражениям, с результатами, полученными по точным аналитическим выражениям.

В *разделе 3.6* проводится анализ нестационарных характеристик надёжности неоднородной дублированной системы типа $\langle GI_2/GI/1 \rangle$ с помощью имитационного моделирования.

Таблица 3. Оценка среднего времени жизни системы $\langle GI_2/GI/1 \rangle$ холодного резервирования.

T2 \ T1	M	WG	PAR	G	LN
M	64,1869	64,76338	56,858	62,98926	62,49893
WG	137,4178	153,4375	190,8524	166,2484	203,6536
PAR	544,1671	42615,25	4087,669	123440,4	21133,71
G	683,5674	520,5019	617,3436	702,315	570,1963
LN	402,9108	873,7433	1554,445	1275,517	1463,264

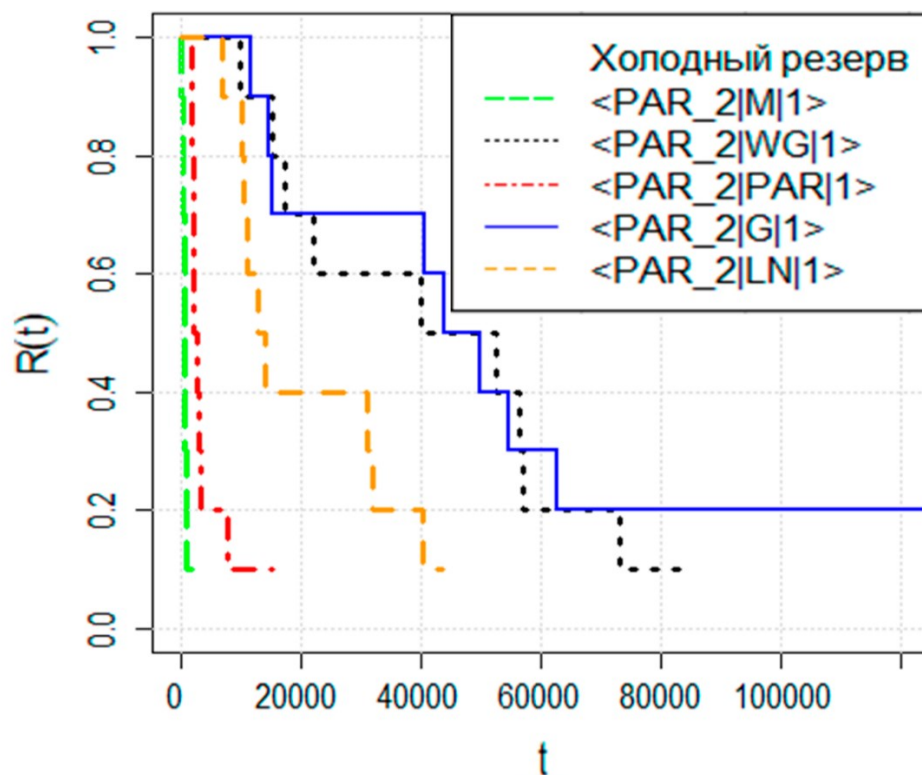


Рисунок 6. Графики функции надёжности $R^*(t)$ системы $\langle PAR_2 / GI / 1 \rangle$

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана и исследована математическая модель замкнутой однородной системы облегчённого, холодного и горячего n -кратного резервирования с экспоненциальной ФР в.б.р. её элементов и произвольным законом распределения времени их ремонта. Также исследована математическая модель замкнутой неоднородной системы холодного дублирования. Получены явные аналитические выражения для вычисления стационарного распределения вероятностей состояний рассмотренных систем как в общем случае, так и для некоторых частных случаев распределений. Получены асимптотические выражения для стационарных вероятностей состояний системы при редких отказах её элементов.
2. Разработан комплекс программ имитационного моделирования на основе дискретно-событийного подхода для численного и графического анализа зависимости от параметров модели характеристик надёжности однородной и неоднородной резервированных систем разных типов резерва. С помощью разработанных имитационных моделей проведено исследование надёжности для самого общего случая, когда как распределение времени безотказной работы, так и распределение времени ремонта отказавших элементов являются произвольными.

3. На основе полученных аналитических и имитационных результатов с использованием экспертных исходных данных проведен численный и графический анализ зависимости характеристик надёжности системы от параметров модели.

Публикации автора по теме диссертационного исследования

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science и Scopus:

1. Houankpo, H. G. K. Mathematical and Simulation Model for Reliability Analysis of a Heterogeneous Redundant Data Transmission System / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev // *Mathematics*. 2021; 9(22): 2884. DOI: 10.3390/math9222884.
2. Houankpo H. G. K. Reliability Model of a Homogeneous Hot-Standby k-Out-of-n: G System / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev. In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds): // *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications*. DCCN 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 13144. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92507-9_29.
3. Houankpo H. G. K. A Simulation Approach to Reliability Assessment of a Redundant System with Arbitrary Input Distributions / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev, E. Nibasumba, [et al.] In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds) // *Distributed Computer and Communication Networks*. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12563. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66471-8_29.
4. Houankpo, H. G. K. Reliability Model of a Homogeneous Warm-Standby Data Transmission System with General Repair Time Distribution / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev. In: Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds) // *Distributed Computer and Communication Networks*, DCCN 2019, Lecture Notes in Computer Science, vol 11965, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36614-8_34.
5. Kozyrev D. V. Reliability Evaluation of a Hexacopter-Based Flight Module of a Tethered Unmanned High-Altitude Platform / D. V. Kozyrev, N. D. Phuong, H. G. K. Houankpo, A. Sokolov. In: Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds) // *Distributed Computer and Communication Networks 2019, Communications in Computer and Information Science*, vol 1141. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-4_52.
6. Houankpo H. G. K. Reliability Analysis of a Homogeneous Hot Standby Data Transmission System / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev, E. Nibasumba, M. N. B. Mouale // In: *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment*

and Management Conference (ESREL2020 PSAM15), 2020, Pp.1-8, ISBN: 978-981-14-8593-0; doi:10.3850/978-981-14-8593-0 5755-cd.

7. Houankpo H. G. K. Mathematical Model for Reliability Analysis of a Heterogeneous Redundant Data Transmission System / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev, E. Nibasumba, M. N. B. Mouale // 12th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Brno, Czech Republic, 2020, Pp.189-194, <https://doi.org/10.1109/ICUMT51630.2020.9222431>.
8. Houankpo H. G. K. 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 / H. G. K. Houankpo, D. V. Kozyrev. In: K. E. Samouilov, L. A. Sevastianov, D. S. Kulyabov (eds.): // Selected Papers of the VII Conference “Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems”, Moscow, Russia, 24-Apr-2017, CEUR Workshop Proceedings 1995, Pp.107-113. Published at <http://ceur-ws.org/> Vol-1995/.

В изданиях из списка ВАК РФ:

9. Уанкпо Г. Ж. К. Моделирование однородной системы передачи данных облегчённого резервирования // Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование», [S.l.], v. 17, n. 3, sep. 2021. ISSN 2411-1473. <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/771>.
10. Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В., Нибасумба Э., Муаль М. Н. Б. Анализ надежности однородной системы передачи данных горячего резервирования // Управление большими системами. Выпуск 87. М.: ИПУ РАН, 2020. С.5-25. DOI: <https://doi.org/10.25728/ubs.2020.87.1>.
11. Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В., Нибасумба Э., Муаль М. Н. Б. Математическая модель анализа надежности неоднородной дублированной системы передачи данных // Современные информационные технологии и ИТ-образование. ISSN 2411-1473. Том 16, №2 (2020). <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/644>, DOI: 10.25559/SITITO.16.202002.285-294.
12. Уанкпо Г. Ж. К., Д. В. Козырев. 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; 15(3): Pp. 542-550. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.542-550.

13. Уанкпо Г. Ж. К., Д. В. Козырев. 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. Том 14, №3. С. 548-555.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях:

14. Уанкпо Г. Ж. К., Д. В. Козырев, И. А. Гудкова. Модель надёжности однородной системы передачи данных горячего резервирования с произвольным распределением времени ремонта элементов // Обозрение прикладной и промышленной математики (ОПиПМ). 2019; 26(4): Рр. 384-386. URL: www.elibrary.ru/item.asp?id=42583668.
15. Kozyrev D. V., Kimenchezhi V., Houankpo H. G. K. Reliability Calculation of a Redundant Heterogeneous System with General Repair Time Distribution // Прикладные проблемы в теории вероятностей и математической статистике в области телекоммуникаций = Applied problems in theory of probabilities and mathematical statistics into telecommunications. Труды XI Международного семинара. Под редакцией Д. Аранити, К.Е. Самуйлова, С.Я. Шоргина. М: РУДН, 2017. - С.12.
16. Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В. Анализ чувствительности характеристик надёжности модели резервирования системы передачи данных к виду распределений времени безотказной работы и ремонта её элементов // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем (ИТТММ-2017). Материалы Всероссийской конференции с международным участием. М.: РУДН, 2017. – С.55-58.
17. Уанкпо Г. Ж. К. Исследование чувствительности характеристик надёжности резервированной системы передачи данных к виду распределений времени между отказами и восстановлениями элементов системы / Г. Ж. К. Уанкпо, Д. В. Козырев // Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ–2017) = 2nd International School on Applied Probability Theory & Communications Technologies (АРТСТ–2017): материалы молодежной научной школы. Россия, Москва, 23–27 октября 2017 г.; под общ. ред. К. Е. Самуйлова, Е. А. Кучерявого, А. Н. Дудина. – Москва: РУДН, 2017. С.299-303.
18. Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В. Анализ чувствительности характеристик надёжности модели дублированной системы передачи данных к виду распределений времени безотказной работы и ремонта её элементов // Материалы 19-й Международной научной конференции "Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление,

вычисление, связь" (DCCN-2016, Москва). М.: РУДН, 2016. Том 3. Под общей редакцией В. М. Вишневого и К. Е. Самуйлова. 2016. С.473-480.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

19. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2020610325. Российская Федерация.* Программа расчета стационарных вероятностей состояний замкнутой однородной системы многократного холодного резервирования с произвольными исходными распределениями / Д. В. Козырев, Г. Ж. К. Уанкпо; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН) — Заявка №2019667442. Дата поступления 25 декабря 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2020 г.
20. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2020610408. Российская Федерация.* Программа расчета средней наработки на отказ замкнутой однородной системы многократного холодного резервирования с произвольными исходными распределениями / Д. В. Козырев, Г. Ж. К. Уанкпо; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН) — Заявка №2019667216. Дата поступления 25 декабря 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 января 2020 г.
21. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2021660642. Российская Федерация.* Программа расчета вероятности безотказной работы замкнутой однородной системы многократного холодного резервирования с произвольными исходными распределениями / Д. В. Козырев, Г. Ж. К. Уанкпо; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН) — Заявка №2020619820. Дата поступления 23 июня 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 июня 2021 г.
22. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2021660643. Российская Федерация.* Программа расчета средней наработки на отказ замкнутой однородной системы многократного горячего резервирования с произвольными исходными распределениями / Д. В. Козырев, Г. Ж. К. Уанкпо; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН) — Заявка №2020619815. Дата поступления 23 июня 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29 июня 2021 г.

Уанкпо Гектор Жибсон Кинманон (Бенин)

Исследование надёжности замкнутой резервированной системы обслуживания с произвольным числом источников данных и ограниченными ресурсами

Диссертационная работа посвящена исследованию показателей надёжности замкнутой резервированной системы обслуживания с произвольным числом источников данных и ограниченными ресурсами для их обработки. Разработан комплекс новых аналитических моделей замкнутой резервированной системы обслуживания с произвольным числом элементов с разными типами резерва. Исследовано поведение системы при редких отказах её элементов и выведены асимптотические выражения для вероятностей состояний системы. Разработан комплекс программ имитационного моделирования на основе дискретно-событийного подхода для численного и графического анализа надёжности однородных и неоднородных резервированных систем разных типов резерва с произвольными функциями распределения времени безотказной работы и времени ремонта элементов. С помощью разработанных вычислительных алгоритмов и программных средств проведен численный и графический анализ зависимости характеристик надёжности системы от входных параметров модели.

Houankpo Hector Gibson Kinmanhon (Benin)

Reliability study of a closed redundant queuing system with an arbitrary number of data sources and limited resources

The thesis is devoted to the study of reliability indicators of a closed redundant system with an arbitrary number of data sources and limited resources for processing them. A set of new analytical models of the closed redundant system with an arbitrary number of elements and different types of redundancy has been developed. The behavior of the system during rare failures of its elements is studied and asymptotic expressions for the probabilities of system states are derived. A set of simulation programs has been developed based on a discrete-event approach for numerical and graphical analysis of the reliability of homogeneous and heterogeneous redundant systems of various types of redundancy with arbitrary distributions of uptime and repair time of elements. Using the developed computational algorithms and software packages, a numerical and graphical analysis of the sensitivity of the system reliability characteristics on the input parameters of the model was carried out.