

УДК 519.23:005.334: 004.942

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.005

Модель выработки решений по организации профилактических ремонтов инфокоммуникационной техники на основе принципа единого ресурса

Мальцев Никита Дмитриевич¹, Полетайкин Алексей Николаевич²,

Данилова Любовь Филипповна¹

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Россия, Новосибирск, nikita.maltsevvv@gmail.com

²Кубанский государственный университет,
Россия, Краснодар

Аннотация. В данной статье разрабатывается подход к генерации управленческих решений по организации профилактических ремонтов комплекса технических средств (КТС) инфокоммуникационной техники. Для выработки решений применяется метод имитационного моделирования, что позволяет прогнозировать необходимость проведения профилактических ремонтов и вероятность возникновения нештатных ситуаций функционирования КТС. Рассматриваются основные проблемы, связанные с применением метода имитационного моделирования для выработки решений по организации профилактических ремонтов КТС, а также пути их решения. Особое внимание уделяется обеспечению оптимального режима реагирования на возникающие инциденты и выработки организационных решений по профилактике КТС на основе принципа единого ресурса. Это обеспечивает минимизацию затрат материальных и трудовых ресурсов на выполнение профилактических ремонтов и повышает надежность инфокоммуникационной техники.

Ключевые слова: профилактические ремонты, инфокоммуникационная техника, принцип единого ресурса, имитационное моделирование, надежность комплекса технических средств, оптимизация организационных процессов

Цитирование: Мальцев Н.Д. Модель выработки решений по организации профилактических ремонтов инфокоммуникационной техники на основе принципа единого ресурса / Н.Д. Мальцев, А.Н. Полетайкин, Л.Ф. Данилова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 57-73. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.005.

Введение. Современные подходы к управлению техническими системами направлены на обеспечение надежности и долговечности технических средств (ТС). Однако отсутствие четкой модели профилактических ремонтов приводит к снижению эффективности эксплуатации таких систем. К их числу относятся инфокоммуникационные системы, требующие надежной работы оборудования и сетей, минимизации простоев и рисков отказов оборудования. Организация профилактических ремонтов должна учитывать оптимальное использование ресурсов. В исследовании применен метод имитационного моделирования, что позволило прогнозировать необходимость проведения профилактических ремонтов и вероятность возникновения нештатных ситуаций (НШС). Однако применение данного метода связано с рядом проблем, связанных с рационализацией использования ресурсов, как при эксплуатации, так и при проведении профилактических мероприятий.

1. Постановка задачи. Целью данной работы является исследование применения метода имитационного моделирования для планирования профилактических ремонтов, что обеспечит оптимальное использование ресурсов и повышение надежности инфокоммуникационной системы. В качестве инструментального средства имитационного моделирования выбран пакет AnyLogic ([https:// www.anylogic.ru](https://www.anylogic.ru)).

Задачи исследования:

1. Анализ существующих подходов к организации профилактических ремонтов при помощи метода имитационного моделирования, определение их преимуществ и ограничений.

2. Формулировка требований к модели, обеспечивающей прогнозирование необходимости профилактических ремонтных мероприятий.
3. Разработка модели в среде AnyLogic, включающей учет факторов риска, распределение ресурсов и прогнозирование НШС;
4. Тестирование модели и оценка ее практической применимости на примере комплекса инфокоммуникационной техники (ИКТ).

Объект исследования – процессы технического обслуживания и ремонта устройств КТС ИКТ. Предмет исследования – методика организации профилактических ремонтов с использованием метода имитационного моделирования.

2. Анализ существующих подходов. Из-за случайного характера исследуемых процессов расчеты прогнозных данных об отказах ИКТ довольно требовательны в плане учёта множества случайных факторов для прогнозных данных (температура воздуха в помещении, время непрерывной работы и т.д.), чтобы с помощью них получить прогнозы, сопоставимые по качеству (точности) с прогнозами, полученными при помощи метода имитационного моделирования, поэтому все существующие модели основаны на очень строгих допущениях. Состояние многих ИКТ-систем вообще трудно спрогнозировать, поэтому единственным методом, который может быть применен, является имитационное статистическое моделирование [1].

Имитационные подходы полезны в тех случаях, когда аналитические расчеты сложны или нецелесообразны, а эксперименты с реальными объектами затруднены или невозможны из-за затрат, опасности или продолжительности. Более того, моделирование обеспечивает оперативную поддержку принятия решений, хорошо подходит для оценивания стратегии на основе различных сценариев и способствует более глубокому пониманию моделируемой реальности [2]. Существующие решения, описанные далее, демонстрируют широкий спектр подходов и позволяют выбрать наиболее подходящий метод для решения конкретных задач.

Одним из направлений является разработка имитационных моделей для анализа структуры компьютерных сетей. Например, в статье [3] предложена имитационная модель в AnyLogic, оптимизирующая соединение коммутаторов для повышения надежности и производительности сети. Предложено решение, позволяющее моделировать работу сети, включающей несколько коммутаторов, с учетом возможных отказов элементов сети.

Ключевыми особенностями данной работы являются:

- имитирование отказов в сети, что делает модель приближенной к реальным условиям эксплуатации;
- оптимизационный эксперимент, направленный на поиск наиболее эффективной структуры сети.

Работа раскрывает важность применения имитационного моделирования для проектирования и анализа компьютерных сетей. Методология работы, основанная на AnyLogic, демонстрирует высокую адаптивность к изменениям структуры сети, что является важным преимуществом.

В то же время статья оставляет пространство для дальнейших исследований, например, в области расширения модели на более сложные сетевые топологии или интеграции дополнительных факторов, таких, как пропускная способность и задержки передачи данных.

В статье [4] отражена разработка имитационных моделей одноканальной и двухканальной компьютерных сетей в среде AnyLogic. Авторы ставят цель изучить эффективность функционирования сетей и выявить преимущества имитационного моделирования при решении задач оптимизации сложных систем. Одной из ключевых задач исследования стало сравнение производительности вычислительных сетей. Авторы

исследуют, как интенсивность запросов на сервер влияет на эффективность работы одноканальной сети (рис. 1, а), и выявляют её ограничения при увеличении нагрузки.

Результаты анализа показывают, что добавление второго канала (рис. 1, б) позволяет существенно повысить пропускную способность сети, обеспечивая лучшее распределение нагрузки и снижение времени ожидания.

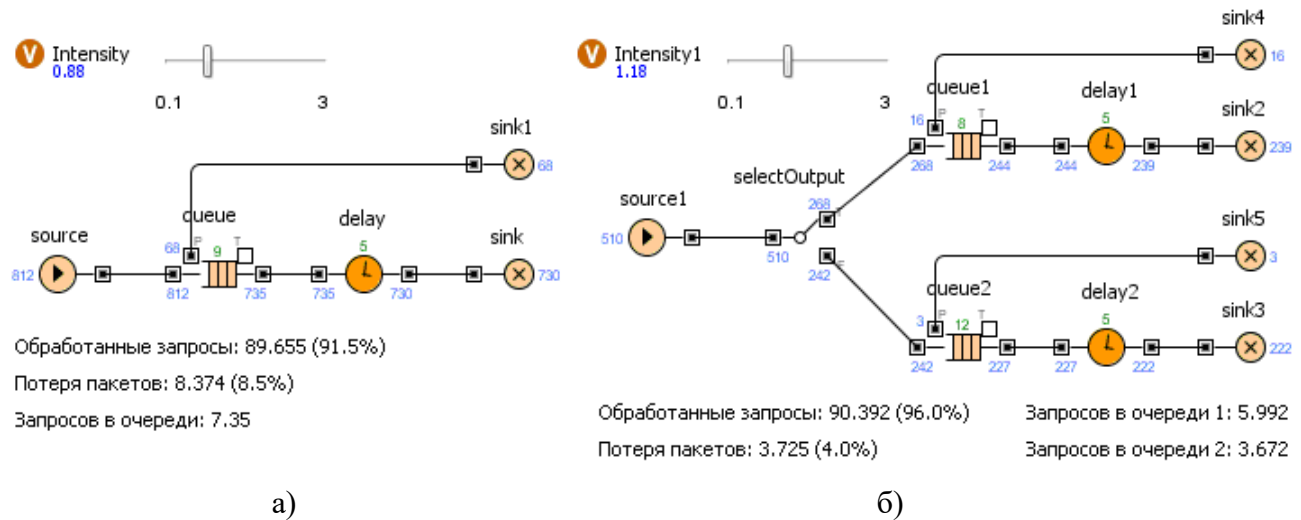


Рис. 1. Одноканальная (а) и двухканальная (б) модель работы сервера [4]

В статье [5] для анализа трафика и потоков используется подход на основе различных законов распределения нагрузочных параметров на характеристики функционирования компьютерной сети. Авторы построили имитационную модель сети в среде AnyLogic для анализа таких параметров, как время ожидания, общее время пребывания заявок и производительность сети. В работе акцент сделан на значения выбора законов распределения времени передачи пакетов, включая экспоненциальное, равномерное, Эрланга и Вейбулла. Результаты моделирования показывают, что законы распределения с коэффициентом вариации, равным или превышающим единицу, существенно влияют на функционирование сети, увеличивая временные задержки и снижая производительность. Исследование подчёркивает значимость использования имитационного моделирования для анализа и оптимизации компьютерных систем. Выводы статьи подтверждают, что выбор закона распределения является ключевым фактором для обеспечения стабильной и эффективной работы сети, что открывает возможности для её дальнейшего проектирования и оптимизации.

Исследование [6] посвящено разработке имитационной модели функционирования сети синхронизации – Synchronization Network (SN), подсистемы телекоммуникационной системы. Основной акцент сделан на моделировании процессов перехода между различными состояниями сети, анализа времени пребывания в каждом состоянии и оценки ключевого показателя – продолжительности цикла управления SN. Этот цикл охватывает период с момента возникновения отказа до восстановления режима передачи синхросигнала. Модель включает 11 состояний сети, разделённых на два класса: состояния, не требующие доступа к системе управления, и состояния, где принятие решений требует значительных ресурсов. Модель учитывает переходы между этими состояниями и ошибки диагностики, которые влияют на процесс восстановления. Модель позволяет оценить влияние характеристик различных подсистем на продолжительность цикла управления и выявить узкие места в процессе восстановления сети. Полученные результаты дают возможность разработать эффективные стратегии управления сетью синхронизации, оптимизировать ресурсы и снизить время простоя сети при сбоях.

Существуют решения, которые уделяют особое внимание вопросам безопасности. Так, в [7] разработан инструмент для исследования воздействия атак на оптические сети связи. Также известен подход к прогнозированию распространения компьютерных вирусов, использующий системно-динамическое моделирование для оценки вероятности эпидемий в компьютерных сетях [8]. Кроме того, разрабатывается многомодельный подход в имитационном моделировании компьютерных сетей (см., например, [9]). Такой подход позволяет использовать различные математические схемы для описания одного объекта, что способствует созданию более точных моделей. Особое внимание уделено сетям Петри, которые применяются для моделирования параллельных и распределённых систем. С помощью сетей Петри можно анализировать структуру и динамическое поведение компьютерных сетей, моделировать потоки информации и процессы, происходящие в системе. Это даёт возможность более детально исследовать структуры и процессы компьютерных сетей. Особое внимание в статье отведено сравнению симуляторов сетей Петри, их функциональности, интерфейса и возможностей. Подчёркивается актуальность многомодельного подхода и его перспективы для исследования компьютерных сетей, а также раскрывает преимущества использования сетей Петри в данном контексте.

Имитационная модель [10] предназначена для анализа и оптимизации процессов обслуживания заявок на ремонт компьютерной техники. Модель построена с использованием среды AnyLogic PLE на основе дискретно-событийного моделирования. Она описывает одноканальную систему массового обслуживания без ограничений, моделирующую процесс обработки заявок с момента их поступления от клиентов до завершения ремонта. Цель модели: проведение вычислительных экспериментов для мониторинга эффективности работы системы обслуживания, прогнозирования эффективности и выявления узких мест в процессах. За основу взят сервер, куда заносятся заявки от клиентов, и диспетчер их обрабатывает. Заявки уходят в очередь заявок на мастеров, либо в отказ. Модель позволяет детализировать каждый этап процесса, изменять параметры очереди, нагрузки и распределение ресурсов сети, времени обработки и вероятностей отклонения заявок, отслеживать ключевые метрики системы (время ожидания, количество обработанных заявок и др.). Недостатками модели являются ограничение масштабируемости, обусловленное использованием бесплатной версии AnyLogic, сложность учёта нестандартных сценариев и ориентированность модели на процессы ремонта компьютерной техники, что требует значительных изменений для адаптации к другим процессам.

Сравнительный анализ рассмотренных подходов и моделей показал (таблица 1), что каждая из моделей имеет сильные стороны, однако ни одна не даёт универсального решения для всех аспектов исследования и оптимизации компьютерных сетей. Они зачастую ограничены спецификой применяемого метода, не учитывают некоторые факторы или требуют значительных усилий для адаптации к конкретным условиям.

Таблица 1. Сравнительная характеристика описанных моделей

Ссылка Показатель	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Назначение	Оптимизация сети	Анализ эффективности сети	Анализ нагрузок на сеть	Анализ атак на сеть	Интеграция моделей	Анализ атак на сеть	Прогноз вирусных эпидемий в сетях	Оптимизация процессов обслуживания заявок
Гибкость	Низкая	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Защищённость	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая	Средняя	Низкая
Открытость	Закрытая	Закрытая	Закрытая	Открытая	Открытая	Открытая	Открытая	Открытая

Это подчеркивает необходимость дальнейшего развития инструментов моделирования, интеграции различных подходов и создания гибких, адаптивных систем, способных более полно охватывать сложность современных компьютерных сетей.

3. Модель организации профилактических ремонтов КТС ИКТ. Ограничения подходов, рассмотренных выше в разделе 2, подтверждают необходимость разработки собственной модели, которая будет учитывать все специфические особенности эксплуатации ИКТ и обеспечит гибкость в анализе различных сценариев.

Для обеспечения эффективности работы КТС и эффективности его технического обслуживания и ремонта необходимо, чтобы ресурс каждого ТС был привязан к ресурсу КТС – был равным ресурсу КТС или был кратным ему, что составляет *принцип единого ресурса*. Отражение в системе существенных свойств ее компонентов, как показано в [11], достигается тогда, когда в содержании (видовом отличии) отражаются функциональные свойства системы в надсистеме, а в объеме компонента отражены внутренние поддерживающие свойства системы, обеспечивающие наличие функциональных свойств, что и составляет указанный выше принцип. В данном случае ресурс ТС есть наработка на отказ, которая измеряется в сутках и определяет промежуток времени, в течение которого данное ТС гарантировано работоспособно. Кратность ресурса ТС – отношение его ресурса r к ресурсу КТС R .

Исходные данные:

- детальная структура КТС и его ресурс R ;
- эксплуатационные показатели ТС;
- характеристики ТС, от которых зависит надежность (условия эксплуатации).

Результаты моделирования:

- 1) точечные оценки показателей надёжности КТС ИКТ;
- 2) вероятности возникновения НШС в заданном интервале времени, а также их возможные последствия для КТС;
- 3) коэффициент технического использования КТС с учетом его восстановления после отказов;
- 4) график плановых (профилактических) ремонтов КТС, построенный в соответствии с принципом единого ресурса.

Результат 4 предполагает группировку устройств КТС по величине требуемого ресурса и их кратности ресурсу КТС. Данная группировка выполнена методом аналогии с группировкой деталей судовых дизелей в соответствии с исследованием [12]:

Группа I – Критическое ТС, ремонт и/или замена которого возможны только при проведении планового ремонта, в условиях сервисного центра и требуют остановки КТС на период ремонта. Ресурс такого устройства не ниже R . Например, серверы, коммутаторы, магистральные сетевые устройства.

Группа II – Важное ТС, ремонт и/или замену которого целесообразно осуществлять при проведении плановых ремонтов или в условиях функционирования КТС с ощутимым понижением эффективности КТС. Ресурс такого устройства не ниже R/n_r , где n_r – заданное число плановых ремонтов. Например, рабочие станции пользователей и их комплектующие (платы оперативной памяти, жесткие диски и др.), консольные устройства, роутеры и др.

Группа III – Второстепенное ТС, ремонт и/или замену которого возможно оперативно выполнить в условиях функционирования КТС без существенного ущерба для КТС. Ресурс такого устройства не ниже $R/(n_r n_{mr})$, где n_{mr} – заданное максимально допустимое число межремонтных остановок КТС. Например, принтеры, сканеры, мультимедийные устройства и др.

В общем виде математическая модель, выражающая степень достижения единого ресурса КТС, имеет вид:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{3R} \left[\frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} r_i^I + \frac{n_r}{N^{II}} \sum_{j=1}^{N^{II}} r_j^{II} + \frac{n_r n_{mr}}{N^{III}} \sum_{l=1}^{N^{III}} r_l^{III} \right], \\ F_2 = \frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} \left[\frac{1}{r_i^I N_i^I} \sum_{j=1}^{N_i^I} r_{ij} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R , n_r , n_{mr} – задаваемые параметры модели (см. выше); N^I , N^{II} , N^{III} – число ТС соответственно I, II, III группы; N_i^I – число элементов i -го ТС I группы; r_i^I – ресурс i -го ТС I группы, ч.; r_j^{II} – ресурс j -го ТС II группы, ч.; r_l^{III} – ресурс l -го ТС III группы, ч.; r_{ij} – ресурс j -го функционального элемента i -го ТС I группы.

Величина F_1 представляет собой степень достижения единого ресурса КТС, состоящего из узлов и устройств, а величина F_2 – степень достижения единого ресурса критическими ТС I группы на уровне их функциональных элементов. Для этих величин верным будет следующее выражение:

$$F_1 \geq 1 \text{ и/или } F_2 \geq 1.$$

В выражении (1) присутствуют 4 переменные (r_i^I , r_j^{II} , r_l^{III} , r_{ij}), на которые оказывают влияние ремонтно-профилактические мероприятия технического обслуживания. Очевидно, что, чем выше величина F , тем больший ресурс реализован, что, безусловно, увеличивает надежность устройств и КТС в целом. Однако это достигается за счет увеличения затрат, т.е. может привести к неоправданному завышению стоимости КТС и его эксплуатации. Поэтому величины F_1 и F_2 целесообразно устремить к единице.

Реализация модели выполнена на языке программирования Java с использованием пакета имитационного моделирования AnyLogic для анализа отказов компонентов и вычисления статистических оценок надежности КТС в двух функциональных аспектах:

- 1) как есть – моделирование функционирования КТС с реальными значениями параметров;
- 2) как должно быть – моделирование функционирования КТС в полном соответствии с принципом единого ресурса.

Модель интегрирует функциональные возможности AnyLogic для работы с компонентами, сетями, а также для графического представления данных. Используются классы и библиотеки Java для управления данными и объектами, такие, как ArrayList, HashMap, TreeSet и Comparator для упрощения хранения и сортировки данных, а также Calendar, Date и Timer для отслеживания временных параметров. Для хранения результатов и подключения к базам данных применяются классы Connection, ResultSet и Statement из пакета java.sql. Визуализация динамики отказов и статистических характеристик выполняется с использованием инструментов ядра Anylogic 8.9.1 и встроенных компонентов AnyLogic, таких, как DensityMap, PedFlowStatistics, а также классов для графического представления элементов (Network, Position) [13].

Для моделирования системы был выбран агентный подход, потому что он позволяет учитывать индивидуальные особенности поведения каждого элемента системы, при этом обрабатывая ключевые события внутри системы в каждый момент времени, являющийся дискретным. Это позволяет исследовать поведение системы на основе действий отдельных ее частей. При этом агентное моделирование комбинировалось с дискретно-событийным подходом для обеспечения простоты схемы перемещения персонала [14].

В модели существуют несколько типов агентов: роутер (Router), коммутатор (Switch), сервер (Server), рабочее место (Workplace), технический инженер (SystemEngineer), и Main – агент верхнего уровня. Агент SystemEngineer выполняет функции по восстановлению, контролю и профилактике ТС (экземпляры агентов Router, Switch, Server, Workplace), за работоспособность которых он ответственен, в порядке очереди.

Апостериори для моделирования временных параметров модели взяты нормально распределенные случайные величины со следующими параметрами распределения: время ремонта – $E = 1$, $\sigma = 1/2$; время контрольных мероприятий – $E = 1/12$, $\sigma = 1/48$; время профилактических мероприятий – $E = 1/4$, $\sigma = 1/24$ при единице модельного времени – сутки.

Каждый агент имеет свои атрибуты (поля), функции (методы) для работы с ними и диаграмму состояний. К примеру, описание состояний агента «Router» представлено на рис. 2.

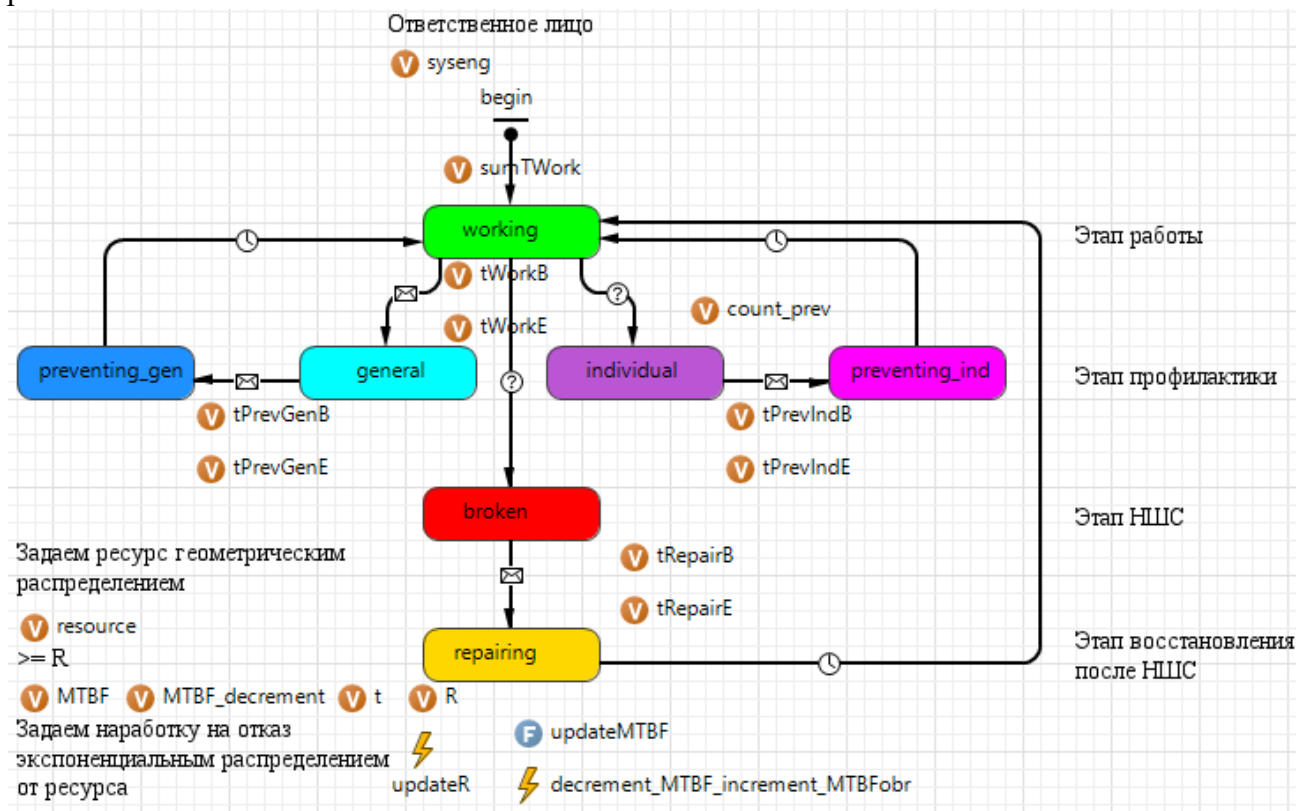


Рис. 2. Диаграмма состояний агента «Router»

Агент «Router» может принимать следующие состояния в зависимости от его ресурса и ресурса всего КТС:

- работоспособное (working) – начальное состояние для ТС, в котором оно стабильно функционирует;
- ожидает контрольное (индивидуальное) мероприятие для предупреждения НШС (individual) – состояние ТС, в которое оно переходит вследствие достижения критического уровня надежности (R) техническим средством;
- в процессе контрольной (индивидуальной) профилактики (preventing_ind) – состояние, в которое переходит ТС после начала работ по индивидуальной профилактике.
- ожидает плановое мероприятие для предупреждения НШС по всему КТС (individual) – состояние ТС, в которое оно переходит вследствие достижения критического уровня надежности (R) всем КТС;
- в процессе плановой профилактики (preventing_gen) – состояние, в которое переходит ТС после начала работ по плановой профилактике;

- неработоспособное (broken) – состояние, в которое переходит ТС в результате возникновения НШС;
- в процессе восстановления (repairing) – состояние, в которое переходит ТС из состояния broken после начала работ по восстановлению его работоспособного состояния.

Ответственное лицо за функционирование КТС обязано соблюдать оптимальный режим реагирования на возникающие инциденты. Возникающие события имеют иерархическую структуру. Наиболее важными событиями являются непосредственно НШС – выходы из строя ТС. Реагирование на данный тип события происходит незамедлительно после завершения работы над текущей операцией. После устранения всех НШС ответственное лицо приступает к проведению профилактических мероприятий, причем в процессе ожидания контрольной профилактики ТС может перейти в состояние ожидания планового ремонта, что подчеркивает более высокий приоритет данного типа профилактики.

По окончании профилактики ресурс увеличивается на долю от изначального времени функционирования ТС (в модели взяты доли 0,1 и 0,3 соответственно для индивидуального и планового профилактического мероприятия).

На данный момент существенных отличий в цикле «working-broken-repairing-working» между агентами нет. Агенты имеют различия в наборе полей (атрибутов). Агент «Switch» помимо вышеперечисленных атрибутов включает в себя поле, идентифицирующее роутер, к которому он подключен. Агент «Server» помимо вышеперечисленных атрибутов включает в себя поле, идентифицирующее коммутатор, к которому он подключен. Агент «Workplace» помимо вышеперечисленных атрибутов включает в себя поле, идентифицирующее сервер, от которого АРМ получает данные для корректного функционирования.

Модель начинает свою работу с создания популяций агентов (рис. 3, а) и инициализации входных параметров (рис. 3, б), которые задают количество ТС (объем популяций), ресурс КТС R , количество профилактических мероприятий и дополнительные параметры (время, по истечении которого ТС не считается браком, критические уровни надежности ТС и КТС). Затем вызывается функция «Initialization», которая размещает экземпляры данных популяций в пространстве и присваивает начальные значения атрибутам (полям) данных агентов (рис. 3, в).

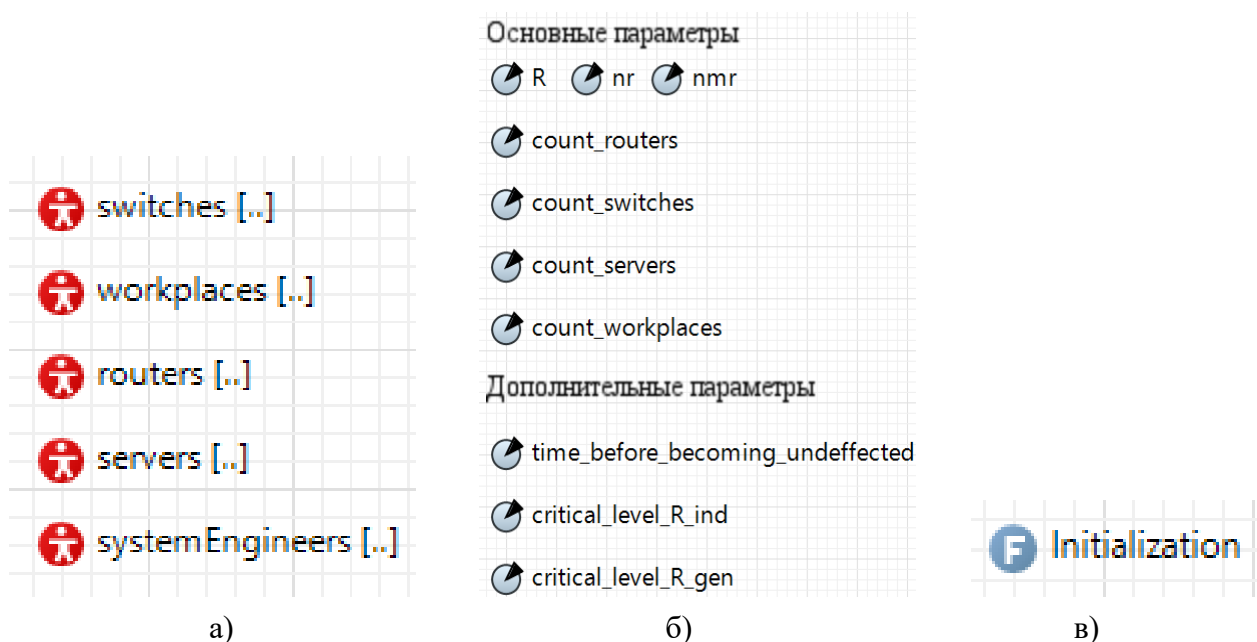


Рис. 3. Параметры имитационной модели: а) популяции агентов в модели, б) входные параметры модели (input), в) функция «Initialization»

Обозначим количество роутеров за Cr . Поведение данной функции можно разделить на 3 случая: $Cr > 1$, $Cr = 1$, $Cr = 0$. При каждом случае выстраивается соответствующая структура КТС в пространстве для обеспечения наглядности связей между агентами (рис. 4).

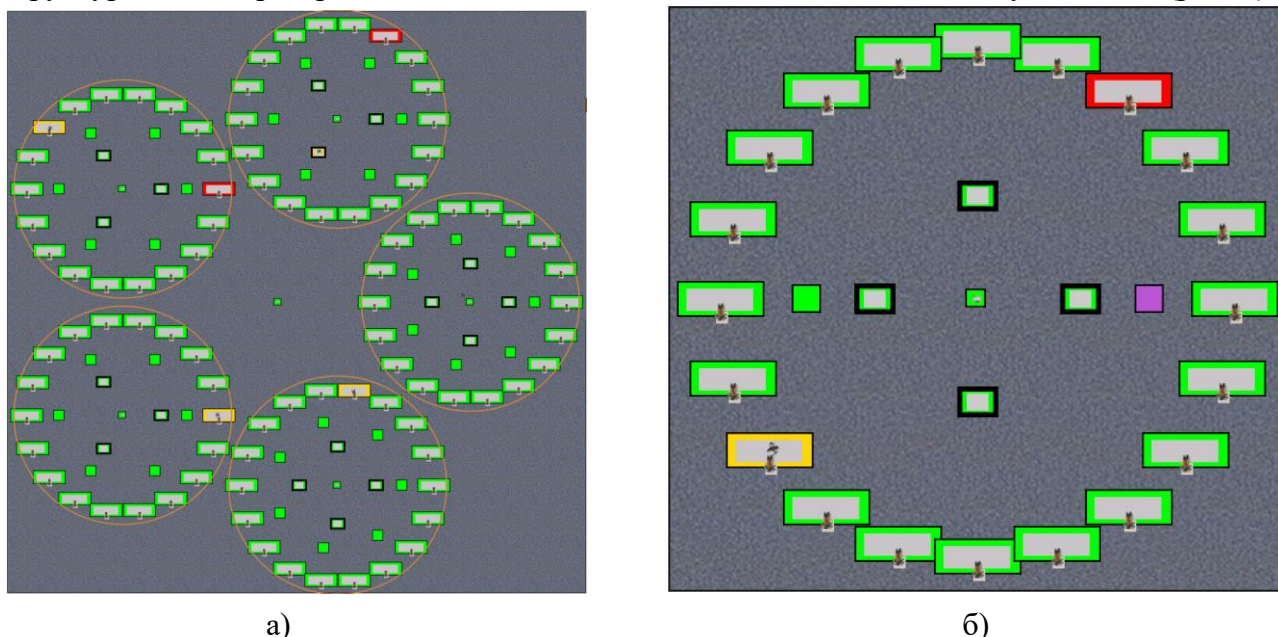


Рис. 4. Случаи распределения ТС в пространстве модели AnyLogic:
а) первый случай ($Cr = 6$), б) второй случай ($Cr = 1$)

Разработанная структура определяет масштаб сети – каждый роутер задает отдельный узел сети, который, как правило, находится на достаточно большом расстоянии от других узлов сети, и необходимо, как минимум, одно ответственное лицо, которое будет поддерживать стабильную работу узла. Предполагается, что для связи между узлами используется центральный узел, осуществляющий доставку пакетов данных между узлами для поддержания топологии сети «звезда». При этом надежность крупномасштабных сетей должна снижаться заметно стремительнее, чем отдельных узлов, так как она их агрегирует, а надежность в процессе функционирования КТС может только убывать.

После вызова функции инициализации начинается процесс функционирования КТС – технические средства циклично переходят из работоспособного состояния в неработоспособное. Время функционирования и время восстановления, количество работоспособных элементов и элементов, вышедших из строя в результате НШС, фиксируется в переменных агента верхнего уровня Main (рис. 5). Время функционирования ТС формируется из базового ресурса (часть от ресурса КТС R) с коррекцией по геометрически распределенной случайной величине с параметром $p = 0,8$ (предполагается, что лишь 20% ТС перерабатывают свой базовый ресурс). Само время функционирования ТС подчиняется экспоненциальному распределению с соответствующим параметром λ для данного типа агента.

На основании данных из этих переменных формируются агрегированные по всем типам ТС выходные данные модели (output) в соответствии с требованиями к результатам моделирования, примеры которых приведены на рис. 6–8 при входных параметрах модели: count_routers = 6 шт., count_switches = 16 шт., count_servers = 50 шт., count_workplaces = 100 шт., $R = 10000$ дней. Следует отметить возможность анализа выходных данных отдельно по каждому ТС, что лучше поддается анализу и интерпретации.

Обозначим за t время эксплуатации системы, измеряемое в сутках, в течение которого оцениваются параметры надежности и эксплуатационные характеристики КТС, тогда с учетом обозначений получим следующие оценки надежности системы.

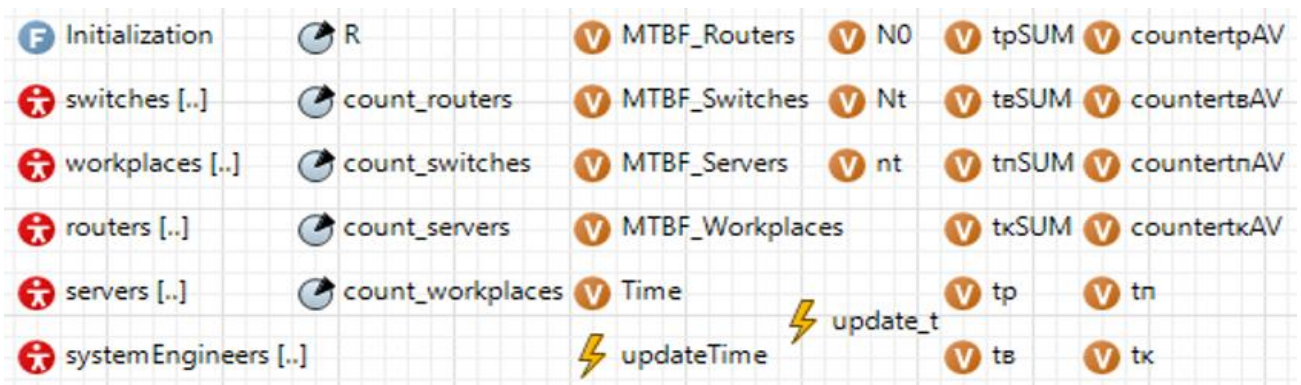


Рис. 5. Переменные агента верхнего уровня Main

Для экспоненциального распределения отказов точечная оценка средней наработки на отказ с учётом восстановления:

$$\tilde{\tau} = \frac{S}{n_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где S – суммарная наработка всех систем за время испытаний (суток); n_{Σ} – суммарное число отказов всех систем за время испытаний (штук).

Оценка интенсивности отказов $\tilde{\lambda}$ при экспоненциальном распределении может быть определена через оценку средней наработки на отказ как обратная её величина. При этом на достаточно большом интервале продолжительности испытаний $\hat{T}$ оценка параметра $\tilde{\omega}$ простейшего потока совпадает с оценкой интенсивности отказов $\tilde{\lambda}$:

$$\tilde{\omega} = \tilde{\lambda} = \frac{1}{\tilde{\tau}}. \quad (3)$$

Графики зависимостей значений величин $\tilde{\tau}$ и $\tilde{\omega}$ от параметров реализации модели показаны на рис. 6.

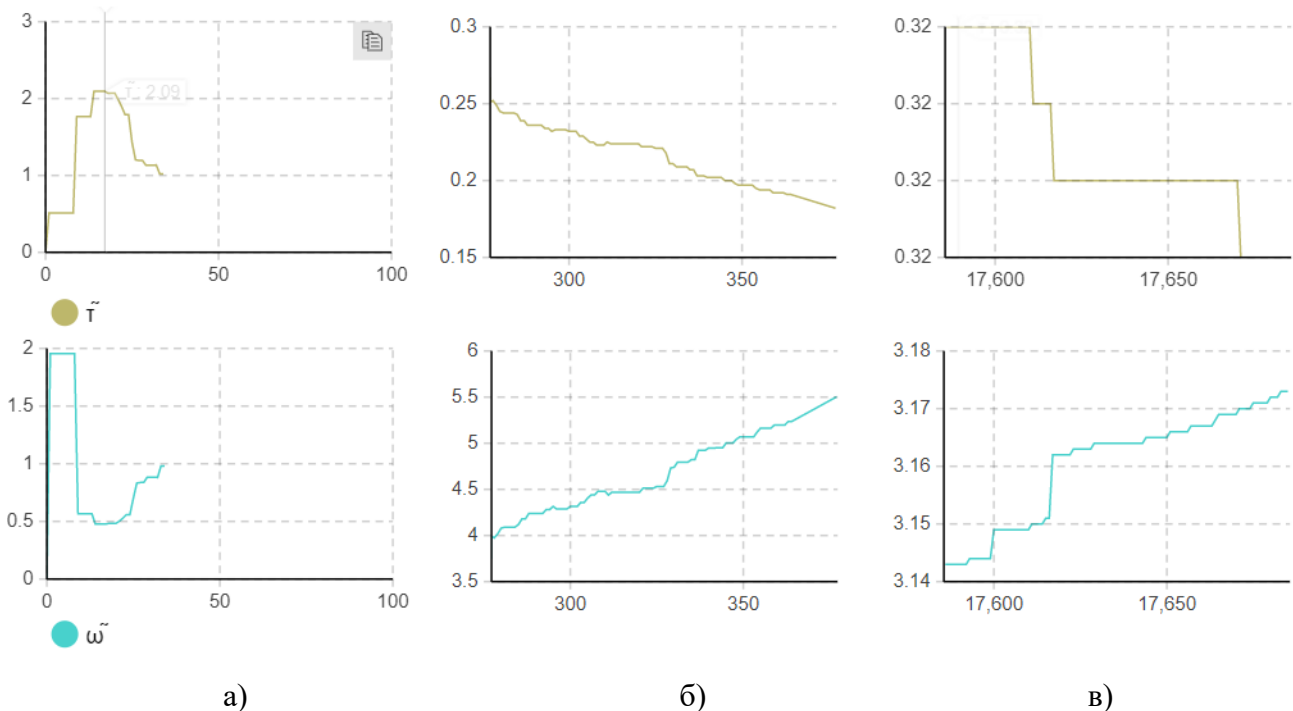


Рис. 6. Значения выходных параметров $\tilde{\tau}$ (дней) и $\tilde{\omega}$ (дней⁻¹):

а) при $t < 30$ (месяц), б) при $t > 365$ (~год), в) при $t \rightarrow \infty$

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в заданном интервале времени t не возникает отказ ТС. Эта характеристика связана с функцией распределения времени безотказной работы следующим соотношением:

$$P(t) = 1 - Q(t),$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы, $Q(t)$ – функция распределения времени безотказной работы, выражающая вероятность появления отказа в течение времени t .

Очевидно, что $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$. Следует также отметить, что функция $P(t)$ является монотонно убывающей, так как надёжность в процессе эксплуатации может только убывать.

Для определения статистической величины $P(t)$ используется следующая оценка:

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (4)$$

где N_0 – число элементов, поставленных на эксплуатацию (штук); $n(t)$ – число элементов, отказавших в течение времени t (штук).

Коэффициент готовности K_G – вероятность того, что в течение времени t аппаратура КТС работоспособна.

Для определения величины K_G используется следующая статистическая оценка:

$$K_G^*(t) = \frac{N_t}{N_0}, \quad (5)$$

где N_0 – общее число элементов (штук), N_t – число элементов, находящихся в работоспособном состоянии в течение времени t (штук). При этом надёжность P – это монотонно убывающая величина, зависящая от количества отказов (в период приработки она стремительно уменьшается), а коэффициент готовности характеризует долю работоспособных ТС от общего количества ТС в данный конкретный момент.

Коэффициент технического использования – относительная доля времени в цикле $T_{ц}$, когда аппаратура выполняет заданные функции. Полное время $T_{ц}$ может быть разделено на следующие составляющие: t_p – время работы, затрачиваемое на выполнение заданных функций (суток); t_e – время, затрачиваемое на восстановления после появления отказов (суток); t_n – время, затрачиваемое на проведение профилактических мероприятий (суток); t_k – время, затрачиваемое на проведение контроля работоспособности оборудования (суток). Для определения этого коэффициента используется следующая статистическая оценка:

$$K_{И}^* = \frac{t_p}{t_p + t_e + t_n + t_k}. \quad (6)$$

Графики зависимостей значений коэффициентов P^* , K_G , $K_{И}^*$ от времени функционирования КТС показаны на рис. 7, а значений временных параметров t_p , t_e , t_k и t_n – на рис. 8 (до окончания периода приработки параметры t_k и t_n сохраняют нулевое значение).

4. Принятие управленческих решений. Практическое применение модели для организации профилактических ремонтов ИКТ рассмотрим на конкретном примере. Возьмем результаты запуска имитационного эксперимента из предыдущего раздела. Показатель $\tilde{\tau}$ (2) в начале эксперимента стремительно возрастает, затем монотонно убывает. Это является следствием периода приработки, в течение которого выходят из строя ТС, к которым не применяются профилактические мероприятия.

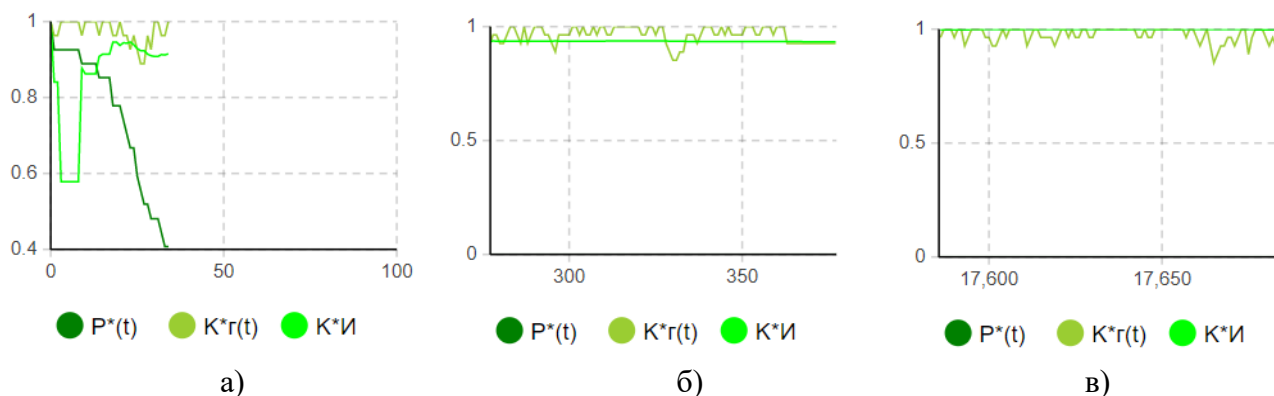


Рис. 7. Значения выходных параметров $P^*(t)$, $K_r^*(t)$ и K_{II}^* :

а) при $t < 30$ (месяц), б) при $t > 365$ (~год), в) при $t \rightarrow \infty$

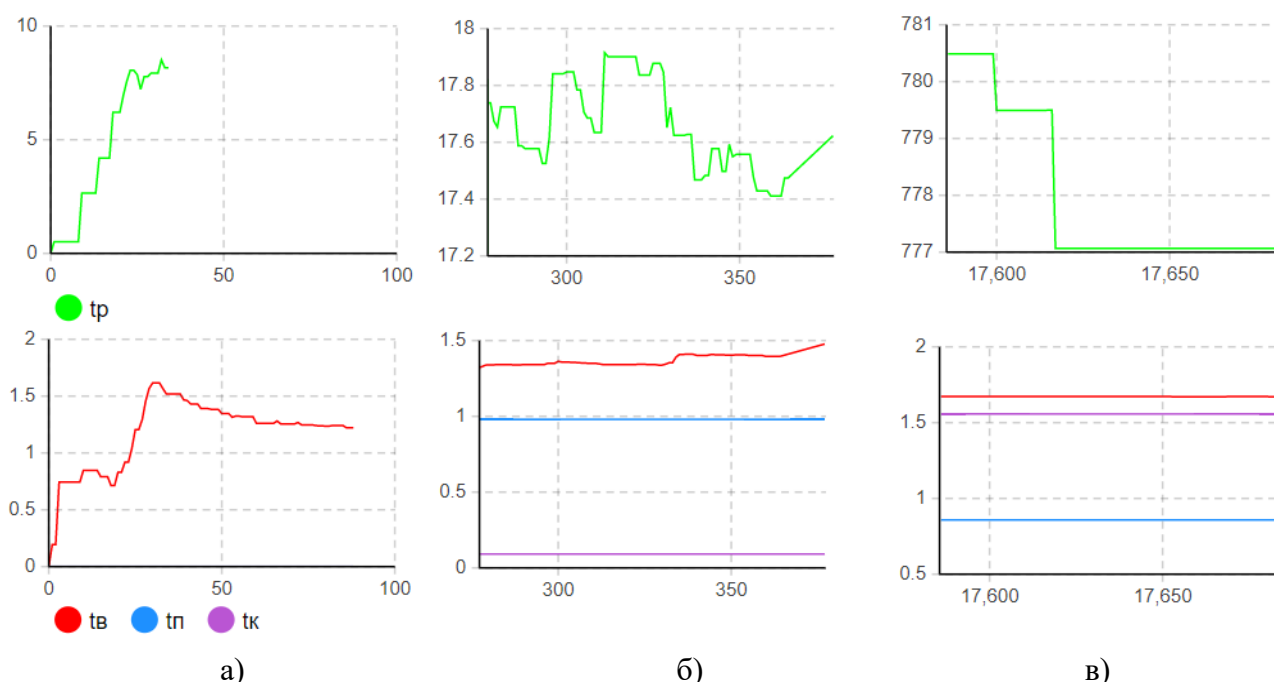


Рис. 8. Значения временных параметров t_p , t_e , t_k и t_n

а) при $t < 30$ (месяц), б) при $t > 365$ (~год), в) при $t \rightarrow \infty$

Порог брака задается во входных параметрах модели (см. рис. 3, б). Данный показатель определяет минимальный промежуток времени, в течении которого ТС должно оставаться работоспособным после ввода в эксплуатацию. В случае недостижения минимальной наработки на отказ ТС признается бракованным, и к нему не применяются профилактические мероприятия.

Показатель (2) возрастает при увеличении количества профилактических мероприятий, но за этим могут следовать дополнительные издержки. В частности, можно наблюдать эффект от проведения профилактических мероприятий, сравнивая данный коэффициент после периода приработки ($t > 365$ и $t \rightarrow \infty$).

Показатель (3) $\tilde{\omega} \approx 0$ в период приработки стремительно возрастает с последующей коррекцией. После коррекции возникает возрастающий тренд, направление которого периодически меняется при проведении профилактических мероприятий. В частности, можно наблюдать эффект от проведения профилактических мероприятий, сравнивая данный коэффициент после периода приработки ($t > 365$ и $t \rightarrow \infty$).

Коэффициент $P^*(t)$ (4) показывает надежность КТС в целом. Он игнорирует продолжительность работы и восстановления оборудования и ссылается лишь на отказы оборудования за промежуток времени t . Очевидно, что он может только убывать, в пределе достигая значения нуля. В период приработки существенно снижается, по истечению периода приработки фиксируется на определенном уровне с убывающим трендом. Коэффициент готовности $K_g^*(t)$ (5) позволяет отслеживать моменты времени, в которые КТС наиболее подвержен отказам. Скачки данного показателя сигнализируют об отказе части системы в конкретные промежутки времени. Коэффициент технического использования K_{IT}^* (6) указывает на то, что ресурс R и кратные ему ресурсы r значительно превосходят время нахождения в иных состояниях, которое можно оценить по последним показателям t_e, t_n, t_k . Также стоит различать показатели t_p и $\tilde{t}$. Первый не учитывает отказы оборудования, а лишь показывает среднее время нахождения в работоспособном состоянии, в то время, как второй считает именно средний промежуток времени между отказами.

Таким образом, можно констатировать, что в системе профилактические мероприятия оказывают большое влияние на работу КТС. Эффект от проведения профилактических мероприятий подтверждает положительное влияние на систему в целом в виде предупреждения НШС. Целесообразность введения профилактических мероприятий для повышения надежности КТС обоснована, и теперь стоит задача оптимизации количества таковых мероприятий, потому как они сопровождаются дополнительными издержками.

Поскольку рассмотрение стоимости проведения профилактических мероприятий на данном уровне абстракции не предусмотрено, необходимо найти минимальное количество мероприятий, при котором достигается максимальный эффект, учитывая, что наработка на отказ не должна превосходить базовый ресурс, так как в этом случае нарушается принцип единого ресурса.

Система предусматривает нахождение оптимального количества мероприятий путем оптимизационного эксперимента. Поскольку в AnyLogic нельзя устремить целевую функцию к константе (в выражении (1) $F_1 \rightarrow 1$), но можно максимизировать либо минимизировать, то путем несложных преобразований получаем следующую целевую функцию из критерия F_1 :

$$\left[\frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} r_i^I + \frac{n_r}{N^{II}} \sum_{j=1}^{N^{II}} r_j^{II} + \frac{n_r n_{mr}}{N^{III}} \sum_{l=1}^{N^{III}} r_l^{III} \right] - 3R \rightarrow \min$$

Также, необходимо ввести систему ограничений. Для этого приравняем критерий F_2 единице (данное значение соответствует принципу единого ресурса):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{r_i N_i} \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij} \right] = 1.$$

Результаты оптимизационного эксперимента и его входные параметры представлены на рис. 9, горизонт планирования – 10 лет. Здесь по оси ординат отложено значение приведенной целевой функции, по оси абсцисс – итерации оптимизационного алгоритма.

По результатам оптимизационного эксперимента видно, что достаточно трех плановых ремонтов с полной остановкой КТС в год при условии, что между ними будет проведено 10 межремонтных остановок ТС в целях профилактики.

На результаты данного эксперимента ЛПР может ссылаться при принятии решения о количестве профилактических мероприятий в течение времени t , обосновывая свое решение тем, что при данном количестве профилактических мероприятий в отношении КТС

достигается единый ресурс R . Также можно сделать вывод о том, что техника КТС в целом надежная, но она не может работать непрерывно в течение длительного промежутка времени.

model_nil : Optimization

	Текущее	Лучшее
Итерация:	74	29
Функционал:	-243.305	-7,518.178
Параметры	Copy best	
count_routers	6	6
count_switches	17	17
count_servers	32	32
count_workplaces	90	90
nr	27	24
nmr	94	100
R	1,000	1,000
time_before_becoming_undefined	180	180
critical_level_R_ind	0.2	0.2
critical_level_R_gen	0.5	0.5

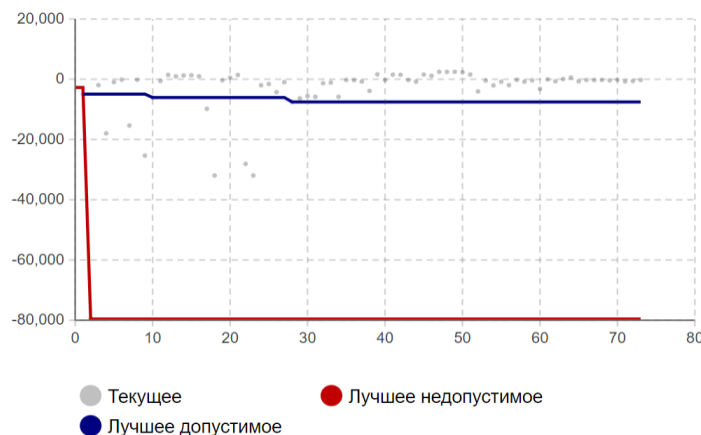


Рис. 9. Результаты оптимизационного эксперимента

Заключение. Разработанная модель выработки решений по организации профилактических ремонтов технических средств ИКТ направлена на повышение устойчивости цифровой среды организации. Применение метода агентного моделирования позволило учесть децентрализованную структуру системы и гибко анализировать различные сценарии эксплуатации. Выбор метода имитационного статистического моделирования и его реализация в среде AnyLogic показали свою эффективность для решения поставленных задач, однако выявили необходимость дальнейшей калибровки и настройки модели для повышения точности прогнозирования.

Анализ существующих моделей показал, что предложенные решения не вполне удовлетворяют специфическим требованиям задачи из-за ограничений в учете всех факторов, влияющих на процессы профилактических ремонтов. В связи с этим была обоснована необходимость разработки новой модели, которая позволяет более точно моделировать различные аспекты работы инфокоммуникационных систем и эффективно прогнозировать потребность в профилактических ремонтах с учетом принципа единого ресурса. Результаты исследования подтверждают целесообразность использования предложенной модели для оптимизации процессов эксплуатации инфокоммуникационной техники, что в дальнейшем может способствовать повышению ее надежности и снижению затрат на обслуживание.

Также дальнейшие исследования будут направлены на развитие модели посредством добавления показателей надежности устройств ИКТ и обеспечения информационно-технической устойчивости комплекса ИКТ, находящегося под разноректорным внешним информационным воздействием [15]. Также планируется реализация оптимизационной модели для составления графика профилактических мероприятий.

Список источников

1. Qodirov A., Ganiyev A., Sherjanova K. Modeling the intermediate node of network based on M/M/2/1 system model in Anylogic program. Communications, 2019, no. 7(1), pp. 25-30, DOI: 10.11648/j.com.20190701.14.
2. Kogler C., Rauch P. Game-based workshops for the wood supply chain to facilitate knowledge transfer. International journal of simulation modelling, 2020, vol. 19(3), pp. 446-457, DOI: 10.2507/IJSIMM19-3-526.

3. Попов А.А. Оптимизация структуры компьютерной сети средствами имитационного моделирования в среде AnyLogic / А.А. Попов, М.М. Яблокова // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации, 2016. – № 6-2. – С. 181-190. – EDN WMFUSR.
4. Обухов П.А. Разработка имитационных моделей в среде AnyLogic для исследования эффективности работы компьютерных сетей / П. А. Обухов, А. Б. Николаев // Автоматизация и управление в технических системах, 2014. – № 4(12). – С. 71-81. – DOI: 10.12731/2306-1561-2014-4-8. – EDN TGMHBT.
5. Фарашиани М.А. Оценка влияния законов распределения параметров нагрузки на качество функционирования компьютерной сети / М.А. Фарашиани, Л.А. Муравьева-Витковская // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: в 5 т., Санкт-Петербург, 02–06 февраля 2016 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016. – С. 135-137. – EDN ZOPGUJ.
6. Kanaev A.K., Oparin E.V, Oparina E.V. Model of the synchronization network functioning process in the context of intellectualization of network control functions. E3S Web Conf., 2020, vol. 224, 01028, DOI: 10.1051/e3sconf/202022401028.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667024 РФ. Имитационная модель процесса функционирования транспортной сети связи в условиях реализации компьютерных атак: № 2019666102: заявл. 09.12.2019; опубл. 18.12.2019 / А. Н. Иванин. – EDN RIMDJQ.
8. Шална Н. А. Исследование возможности применения метода системно-динамического моделирования для прогнозирования вирусных эпидемий в компьютерных сетях / Н.А. Шална, А.А. Сторожева // Молодежный научно-технический вестник, 2017. – № 5. – С. 45. – EDN ZRNHIT.
9. Семеновых А.А. Многомодельный подход к моделированию компьютерных сетей / А.А. Семеновых // Вестник молодых ученых ПГНИУ: сборник научных трудов / отв. редактор В.А. Бячкова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2015. – Т. 5. – С. 144-151. – EDN WAUDYF.
10. Веремчук Н.С. О разработке имитационной модели по ремонту компьютерной техники / Н.С. Веремчук // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции, Омск, 28 апреля – 29 2022 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 551-556. – EDN RIXEPD.
11. Маторин С.И. Детерминантная модель системы и системологический анализ принципов детерминизма и бесконечности мира / С.И. Маторин, Е.А. Соловьева // НТИ, 1996. – Сер. 2. – № 8. – С. 1-8.
12. Костенко А.В. Принцип единого ресурса при проектировании и производстве деталей судовых дизелей / А.В. Костенко, А.Н. Полетайкин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2018. – № 4(63). – С. 43-48. – EDN XUXMKT.
13. Java в AnyLogic: общие сведения об использовании Java в Anylogic. – URL: <https://anylogic.help/ru/advanced/code/general.html> (Дата обращения: 25.02.25).
14. Россихин Л.В. Агентное моделирование задачи распределения ресурса / Л.В. Россихина // Информационные технологии в УИС, 2024. – № 3. – С. 21-29. – EDN ZLLDVL.
15. Карпович А.И. Определение категории устойчивости в сложных социотехнических системах / А.И. Карпович, А.В. Никифорова, А.Н. Полетайкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки, 2017. – № 1. – С. 147-163. – EDN YKJVBJ.

Мальцев Никита Дмитриевич. Студент 4 курса кафедры математического моделирования и цифрового развития бизнес-систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. AuthorID: 1288964, SPIN: 9795-2490, nikita.maltsevv@gmail.com, 630009, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

Полетайкин Алексей Николаевич. Кандидат технических наук, кафедра информационных технологий, Кубанский государственный университет. AuthorID: 768719, SPIN: 1142-5984, Scopus AuthorID: 57213829361, ORCID: 0000-0002-5128-1952, alex.poletaykin@gmail.com, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Данилова Любовь Филипповна. Кандидат технических наук, кафедра математического моделирования и цифрового развития бизнес-систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. AuthorID: 992817, SPIN: 8125-9603, Scopus AuthorID: 57215304358, ORCID: 0000-0003-0907-0200, LubErmolenko@yandex.ru, 630009, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

UDC 519.23:005.334: 004.942

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.005

A Decision-making model for organizing preventive maintenance of infocommunication equipment based on the unified resource principle

Nikita D. Maltsev¹, Alexei N. Poletaikin², Lyubov F. Danilova¹

¹Siberian state university of telecommunications and information science,
Russia, Novosibirsk, nikita.maltsevvv@gmail.com

²Kuban state university,
Russia, Krasnodar

Abstract. This article develops an approach to generating managerial decisions for organizing preventive maintenance of a complex of technical means (CTM) of infocommunication equipment. The decision-making process utilizes the simulation modeling method, enabling the prediction of the need for preventive maintenance and the likelihood of emergencies in CTM operation. The article addresses key challenges associated with the use of simulation modeling for organizing CTM preventive maintenance and proposes solutions to these issues. Particular attention is given to ensuring an optimal response mode to emerging incidents and generating organizational decisions for CTM maintenance based on the unified resource principle. This approach minimizes material and labor costs for conducting preventive maintenance and improves the reliability of ICT.

Keywords: preventive maintenance, infocommunication equipment, unified resource principle, simulation modeling, technical means reliability, optimization of organizational processes

References

1. Qodirov A., Ganiyev A., Sherjanova K. Modeling the intermediate node of network based on M/M/2/1 system model in Anylogic program. Communications, 2019, no. 7(1), pp. 25-30, DOI: 10.11648/j.com.20190701.14.
2. Kogler C., Rauch P. Game-based workshops for the wood supply chain to facilitate knowledge transfer. International journal of simulation modelling, 2020, vol. 19(3), p. 446-457, DOI: 10.2507/IJSIMM19-3-526.
3. Popov A.A., Yablokova M.M. Optimizatsiya strukturnoy seti s pomoshch'yu imitatsionnogo komp'yuternogo modelirovaniya v srede anylogic [Optimization of the structure of a computer network by means of simulation modeling in the anylogic environment]. Informatsionnyye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii [Information technologies, Radio electronics, Telecommunications], 2016, no. 6-2, pp. 181-190, EDN WMFUSR.
4. Obukhov P.A., Nikolaev A.B. Razrabotka imitatsionnykh modeley v srede anylogic dlya issledovaniya effektivnosti raboty komp'yuternykh setey [Development of simulation models in the anylogic environment for studying the efficiency of computer networks]. Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh [Automation and control in technical systems], 2014, no. 4(12), pp. 71-81, DOI: 10.12731/2306-1561-2014-4-8, EDN TGMHBT.
5. Farashiani M.A., Muravyeva-Vitkovskaya L.A. Otsenka raspredeleniya parametrov nagruzki na kachestvo raboty komp'yuternoy seti [Assessment of the influence of the laws of distribution of load parameters on the quality of computer network functioning]. Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO: v 5 t., Sankt-Peterburg, 02-06 fevralya 2016 goda, Tom 5, Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, [Almanac of scientific papers of young scientists of ITMO University : in 5 volumes, St. Petersburg, February 02-06, 2016, Volume 5, Saint Petersburg: Saint Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics], 2016, pp. 135-137, EDN ZOPGUJ.
6. Kanaev A.K., Oparin E.V., Oparina E.V. Model of the synchronization network functioning process in the context of intellectualization of network control functions. E3S Web Conf., 2020, vol. 224, 01028, DOI: 10.1051/e3sconf/202022401028
7. Ivanin A.N. Imitatsionnaya model' protsessa vklyucheniya transportnoy seti svyazi v usloviyakh realizatsii komp'yuternykh atak [Simulation model of the process of functioning of a transport communication network in the context of computer attacks]. Certificate of state registration of the computer program no. 2019667024 Russian Federation, 09.12.2019, publ. 18.12.2019, EDN RIMDJQ.
8. Shalna N.A., Storozheva A.A. Issledovaniye vozmozhnostey primeneniya metoda sistemno-dinamicheskogo modelirovaniya dlya prognozirovaniya virusnykh epidemiy v komp'yuternykh setyakh [Investigation of the possibility of using the method of system-dynamic modeling to predict viral epidemics in computer networks].

- Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik [Youth scientific and technical bulletin], 2017, no. 5, pp. 45, EDN ZRNHIT.
9. Semenov A.A. Mnogomodel'nyy podkhod k modelirovaniyu komp'yuternykh setey [A multi-model approach to computer network modeling]. Vestnik molodykh uchenykh PGNIU: sbornik nauchnykh trudov / otv. redaktor V.A. Byachkova; Permskiy gosudarstvennyy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet, Perm': Permskiy gosudarstvennyy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet [Bulletin of young scientists of the Russian State national research university, collection of scientific papers, editor-in-chief V.A. Byachkova, Perm state national research university, Perm, Perm state national research university], 2015, vol. 5, pp. 144-151, EDN WAUDYF.
 10. Veremchuk N.S. O razrabotke imitatsionnoy modeli po remontu komp'yuternoy tekhniki [On the development of a simulation model for the repair of computer equipment]. Obrazovaniye. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo: Sbornik materialov V Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Omsk, 28 aprelya – 29 2022 goda. – Omsk: Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet (SibADI) [Education, Transport, Innovation, Author: Sergey Materalov At the National scientific and practical conference, Omsk, April 28 – April 29, 2022, Omsk: Siberian state automobile and road university (SibADI)], 2022, pp. 551-556, EDN RIXEPD.
 11. Matorin S.I. Determinantnaya model' sistemy i sistemologicheskoy analiz printsipov determinizma i beskonечnosti mira [Determinant model of the system and systemological analysis of the principles of determinism and the infinity of the world]. NTI, 1996, ser. 2, no. 8, pp. 1-8.
 12. Kostenko A.V. Printsip yedinogo resursa pri proyektirovani i proizvodstve detaley sudovykh dizeley [The principle of a single resource in the design and production of marine diesel parts]. Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya [Progressive technologies and mechanical engineering systems], 2018, no. 4(63), pp. 43-48, EDN XUXMKT.
 13. Java in AnyLogic: general information about using Java in Anylogic. Available at: <https://anylogic.help/ru/advanced/code/general.html> (accessed: 02/25/25).
 14. Rossikhina L.V. Agentnoye modelirovaniye zadachi raspredeleniya resursa [Agent-based modeling of the resource distribution problem]. Informatsionnyye tekhnologii v UIS [Information technologies in the UIS], 2024, no. 3, pp. 21-29, EDN ZLLDVL.
 15. Karpovich, A. I. Opredeleniye kategorii ustoychivosti v slozhnykh sotsiotekhnicheskikh voprosakh [Definition of the category of stability in complex socio-technical systems]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Sotsial'no-ekonomicheskiye nauki [PNRPU Sociology and economics bulletin, social and economic sciences], 2017, no. 1, pp. 147-164, EDN YKJVBj.

Maltsev Nikita Dmitrievich. Student of the 4th year, department of mathematical modeling and digital development of business systems, Siberian state university of telecommunications and information science. AuthorID: 1288964, SPIN: 9795-2490, nikita.maltsevv@gmail.com, 630009, Russia, Novosibirsk, Kirova str., 86.

Poletaiкин Alexei Nikolaevich. Candidate of technical sciences, department of information technologies, Kuban state university. AuthorID: 768719, SPIN: 1142-5984, Scopus AuthorID: 57213829361, ORCID: 0000-0002-5128-1952, alex.poletaykin@gmail.com, 350040, Russia, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149.

Danilova Lyubov Filippovna. Candidate of technical sciences, department of mathematical modeling and digital development of business systems, Siberian state university of telecommunications and information science. AuthorID: 992817, SPIN: 8125-9603, Scopus AuthorID: 57215304358, ORCID: 0000-0003-0907-0200, LubErmolenko@yandex.ru, 630009, Russia, Novosibirsk, Kirova str., 86.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 22.04.2025.

The article was submitted 01/21/2025; approved after reviewing 03/06/2025; accepted for publication 04/22/2025.