УДК 519.248

А.А. Любченко, Е.Ю. Копытов, А.А. Богданов

Статистическое моделирование качественных показателей эксплуатации и технического обслуживания средств железнодорожной электросвязи в среде AnyLogic

Оборудование электросвязи является функциональной подсистемой железнодорожного транспорта, безопасность и эффективность которого в полной мере зависят от надежного функционирования используемых средств связи. Одним из наиболее популярных сегодня методов поддержания требуемого уровня надежности технологического оборудования на сети железных дорог является проведение технического обслуживания. Для оценки эффективности проводимых профилактических мероприятий используется утвержденный показатель качества технического обслуживания, тогда как для оценки качества процесса эксплуатации в целом применяется коэффициент готовности. Расчет указанных показателей, как правило, выполняется на основе данных о произошедших отказах оборудования, что обладает как существенными преимуществами, так и очевидными недостатками в случае отсутствия или затруднительного получения опытных данных. Современные компьютерные технологии позволяют автоматизировать и значительно упростить процесс оценки целевых показателей качества, что, однако, требует разработки математического обеспечения для выполнения такого анализа. В работе предлагается имитационная модель процесса эксплуатации устройств железнодорожной электросвязи, позволяющая в автоматизированном режиме давать оценку коэффициенту готовности и показателю качества технического обслуживания. Модель учитывает возникновение внезапных, скрытых и ложных отказов устройств, влияние готовности комплектов запасных частей, ошибочных действий обслуживающего персонала, а также периодичности и продолжительности обслуживания и ремонта при оценке качественных показателей. В основу модели положен принцип дискретно-событийного моделирования, реализуемый в отечественном программном обеспечении AnyLogic.

Ключевые слова: железнодорожная электросвязь, качество, коэффициент готовности, AnyLogic.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-98-108

Железнодорожная электросвязь является одной из функциональных подсистем инфраструктуры железнодорожного транспорта, объединяющая технические средства и сооружения связи, обеспечивающие передачу и (или) прием голосовой и (или) неголосовой информации, предназначенной для организации и выполнения технологических процессов железнодорожного транспорта [1]. В соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 33397–2015 «Железнодорожная электросвязь. Общие требования безопасности» к железнодорожной электросвязи (ЖДЭ) относится обширный перечень устройств, от средств коммутации и цифровых транспортных систем до оборудования электропитания средств связи. Очевидно, функциональное назначение средств ЖДЭ определяет высокие требования к их надежности, что является ключевым аспектом при организации эффективного и безопасного перевозочного процесса. Однако, как показывает практика, доля эксплуатационных отказов в системах связи на железнодорожном транспорте остается существенной и составляет 60% [2]. При этом значительное количество средств отдельных групп оборудования уже полностью выработали свой ресурс или эксплуатируются с превышением срока службы. В частности, у пятой части парка локомотивных радиостанций фиксируется стопроцентный износ. С истекшим сроком службы эксплуатируется более 60% стационарных и более 65% возимых радиостанций [2].

Одним из основных методов поддержания требуемого уровня надежности средств ЖДЭ является организация и проведение комплекса профилактических мероприятий по техническому обслуживанию (ТО). При этом управляемое обслуживание является перспективным видом ТО, так как призвано свести к минимуму регламентированное ТО и сократить долю корректирующего обслуживания [3]. Периодичность проведения работ при управляемом ТО определяется дирекциями связи железных дорог с учетом местных условий эксплуатации, анализа статистики отказов за предыдущие периоды и требований к качеству предоставляемых услуг связи. Очевидно, что наиболее адекватное планирование работ может быть сделано по статистическим данным об отказах.

Однако для этого требуется наличие опытных образцов оборудования, а получение релевантного объема статистических данных может потребовать существенно продолжительной эксплуатации и (или) испытаний. Учитывая влияние средств ЖДЭ на безопасность и эффективность перевозочного процесса, такой подход может привести к значительным материальным затратам. Таким образом, применение данного подхода как для устройств, уже находящихся в эксплуатации непродолжительный период времени, так и для вновь внедряемых систем представляется затруднительным.

Одной из возможных альтернатив решения указанной проблемы является применение имитационных моделей процесса эксплуатации средств ЖДЭ. Основное назначение таких моделей заключается в статистическом или вероятностном моделировании переходов технической системы из одного состояния

в другое, имитируя тем самым процесс эксплуатации средств ЖДЭ. В таком случае имеется возможность сбора статистических данных по результатам моделирования и дальнейшего расчета качественных показателей. На основе же полученных оценок можно делать вывод о правильности организации эксплуатации устройств, в частности, периодичности проведения профилактических мероприятий по ТО.

Ранее в работе [4] нами была рассмотрена упрощенная модель процесса эксплуатации средств ЖДЭ с учетом внезапных отказов оборудования и выполняемого ТО. Вычислительные эксперименты с такой моделью дают завышенные оценки качественных показателей, что свидетельствует о необходимости ее усовершенствования для учета большего числа факторов и особенностей процесса технической эксплуатации средств ЖДЭ.

В частности, надежность рассматриваемого оборудования зависит от достоверности как встроенных подсистем контроля, так и диагностических устройств, используемых на этапах профилактических работ и восстановительного ремонта, что в свою очередь обусловливает возникновение скрытых и ложных отказов устройств. Выполнение операций по ТО и ремонту осуществляется персоналом структурных подразделений железных дорог, что требует учета влияния человеческого фактора, а также степени готовности комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП).

Как показано в работе [5], при построении моделей количественной оценки надежности систем связи необходимо уделять особое внимание учету ошибок диагностической аппаратуры (контроля), которые являются причиной возникновения скрытых и ложных отказов. Проведенный анализ литературы позволил сделать вывод об актуальности вопросов оценки надежности технических систем, в том числе и средств связи с учетом влияния ошибок контроля [6–9].

Вопрос влияния ошибочных действий персонала на надежность достаточно проработан и рядом исследований доказано, что качественная подготовка обслуживающего штата и следование рекомендациям по эксплуатации позволяют добиться увеличения надежности аппаратуры в 3–5 раз [10, 11]. По результатам факторного анализа, выполненного по данным единой системы мониторинга и администрирования сетей связи ОАО «РЖД», установлено, что более трети отказов устройств связи вызывается неправильными действиями обслуживающего персонала [2]. Следовательно, необходимость учета человеческого фактора при моделировании процессов эксплуатации средств ЖДЭ является обоснованной.

Восстановление работоспособности средств ЖДЭ осуществляется силами структурных подразделений железных дорог. Поэтому степень готовности необходимого комплекта ЗИП, используемого при ремонтных работах, оказывает непосредственное влияние на оперативность устранения отказов и, следовательно, качественные показатели процесса эксплуатации. Многими исследованиями, результаты которых представлены в [12, 13], доказано существенное влияние готовности комплектов ЗИП на надежность восстанавливаемых систем, примером которых являются рассматриваемые средства железнодорожной электросвязи.

Таким образом, объектом исследования в данной работе является процесс эксплуатации и технического обслуживания средств железнодорожной электросвязи, учитывающий возникновение внезапных, скрытых и ложных отказов оборудования, а также влияние готовности ЗИП и человеческого фактора при проведении восстановительного ремонта и профилактических работ. Целью исследования является анализ показателей качества эксплуатации и ТО средств ЖДЭ на основе данных имитационного моделирования.

Основным комплексным показателем надежности средств железнодорожной электросвязи является коэффициент готовности [5, 14, 15]. Выполненный анализ литературы показал, что показатели надежности восстанавливаемых систем широко используются при решении задачи оценки качества технической эксплуатации, в том числе для средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи [16], структурно-сложных территориально рассредоточенных систем связи [17], а также систем управления движением поездов [18]. В данной работе коэффициент готовности $К_Г$ предлагается использовать как показатель качества эксплуатации технических средств ЖДЭ, а качество ТО оценивать с помощью удельного показателя $Б_у$, регламентируемого положением «О показателе качества технического обслуживания средств связи», утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 20 августа 2014 г. № ЦСС-767/р (далее – положение).

Одним из востребованных в настоящее время подходов к оценке и анализу характеристик процессов функционирования систем различного назначения является имитационное моделирование, называемое также статистическим при учете случайных свойств отдельных элементов модели. В работах [19, 20] подчеркивается преимущество такого вида моделирования перед эмпирическим подходом для случая высоконадежных систем, когда из-за крайне редкого возникновения отказов невозможна оценка показателей надежности с приемлемой точностью. Как результат, статистическое моделирование не только применяется при анализе надежностных характеристик автотранспортных систем [20, 21] и радиоэлектронных средств со сложными алгоритмами резервирования [22], но и является востребованным инструментом для оценки системной надежности компонентного программного обеспечения [23]. Не ограничиваясь задачами анализа надежности, имитационное моделирование является удобным и эффективным методом при исследовании транспортных потоков в железнодорожной сети [24–26].

Сегодня в распоряжении специалистов, занимающихся разработкой имитационных моделей,

имеется продукт отечественного происхождения AnyLogic [27], представляющий собой визуальную среду, объединяющую «все три современные парадигмы построения имитационных моделей: системно-динамическая, дискретно-событийная и агентная» [28]. Кроме того, отличительными особенностями данного продукта являются мощный язык моделирования и интуитивно понятный графический интерфейс, обеспечивающий упрощение и ускорение процесса разработки.

Таким образом, для обеспечения возможности анализа показателей качества эксплуатации и технического обслуживания средств ЖДЭ поставлена задача разработки имитационной модели процесса эксплуатации и ТО с помощью инструмента AnyLogic. Модель предназначена для оценки коэффициента готовности $К_Г$ и удельного показателя качества технического обслуживания $Б_у$ с учетом внезапных, скрытых и ложных отказов устройств, влияния готовности ЗИП и ошибочных действий обслуживающего персонала при выполнении ТО и ремонта. Проведение статистических экспериментов с моделью позволяет выполнять анализ влияния указанных факторов на качественные показатели $К_Г$ и $Б_у$, что может быть использовано при планировании технического обслуживания в качестве инструмента поддержки принятия решений. Помимо учета большего количества факторов в сравнении с ранее рассмотренным подходом в работе [4], преимуществом предлагаемой модели является расчет показателя $Б_у$ в соответствии с действующим положением об оценке качества технического обслуживания оборудования связи на сети дорог ОАО «РЖД». Анализ литературы показал отсутствие возможных аналогов разработанной модели.

Имитационная модель

Разработка любой имитационной модели начинается с формирования концептуального описания исследуемого процесса, или, по-другому, концептуальной модели. Для наглядности концептуальное описание дополняется графической моделью, в виде графа или диаграммы состояний. Для рассматриваемого процесса эксплуатации и ТО диаграмма состояний изображена на рис. 1.

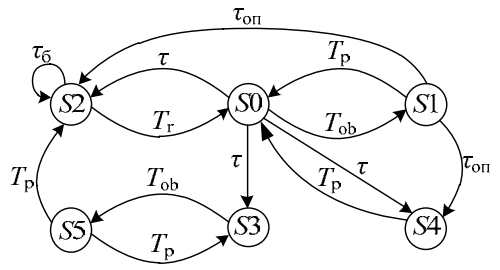

Рис. 1. Графическая модель процесса эксплуатации и ТО средств ЖДЭ

Граф на рис. 1 демонстрирует переходы между следующими состояниями:

– $S0$ – работоспособное;

– $S1$ – состояние технического обслуживания;

– $S2$ – неработоспособное;

– $S3$ – состояние скрытого отказа системы;

– $S4$ – состояние ложного отказа системы;

– $S5$ – состояние технического обслуживания системы в скрытом отказе.

В соответствии с теорией надежности период нормальной эксплуатации большинства технических систем характеризуется постоянством интенсивности отказов [29]. В этот период в первую очередь преобладают внезапные отказы, что обусловлено влиянием внешних случайных факторов. В таком случае зависимость вероятности отказа Q от времени t определяется по экспоненциальному закону в соответствии с выражением

$$Q(t)=1-e^{-\lambda\cdot t}, \qquad (1)$$

где λ – интенсивность отказов, 1/ч.

Следовательно, переход из работоспособного состояния $S0$ в неработоспособное $S2$ происходит в результате внезапного отказа по экспоненциальному закону через случайный интервал времени τ. После проведения ремонта, если персонал не допустил ошибку, система возвращается в работоспособное состояние $S0$ через время $T_г$. Если же при проведении восстановительного ремонта допущена ошибка, то система находится в состоянии $S2$ в течение времени $\tau_б$ до следующего ремонта.

Переходы в состояние $S2$ происходят случайным образом, тогда как переходы в состояние технического обслуживания $S1$ реализуются через регламентируемый интервал времени, соответствующий периодичности обслуживания T_{ob}. Работы по ТО выполняются обслуживающим персоналом региональных центров связи. В силу человеческого фактора с вероятностью $E_{ор}$ может быть допущена ошибка, которая приведет к отказу устройства, что будет соответствовать переходу в состояние $S2$ через время $\tau_{оп}$. После безошибочного выполнения операций по ТО, выполняемого в течение времени $T_р$, аппаратура продолжает нормальное функционирование в состоянии $S0$.

Помимо рассмотренных состояний система через случайные интервалы времени τ в результате ошибочного определения технического состояния встроенными системами контроля может перейти в состояние скрытого $S3$ или ложного $S4$ отказа. Основными характеристиками систем контроля в работе приняты вероятности ошибки диагностирования первого (a) и второго рода (b). Ошибка a задается вероятностью ложной тревоги, т.е. когда работоспособное устройство признается неработоспособным, тогда как ошибка b определяется вероятностью пропуска отказа и, следовательно, неработоспособное устройство диагностируется как работоспособное. Наряду со встроенными системами контроля причиной возникновения скрытых и ложных отказов может быть внешнее диагностическое оборудование, используемое при проведении ТО. Данный вид оборудования также характеризуется ошибками диагностирования a_2 и b_2, а встроенные системы контро-

ля – ошибками a_1 и b_1. Определение того, что произошел один из двух рассматриваемых отказов, производят в течение времени $T_р$. Единственное и главное отличие заключается в том, что состояние ложного отказа *S*4 диагностируется мгновенно, тогда как скрытый *S*3 отказ может быть обнаружен во время ТО, выполняемого через интервалы $T_{об}$. Следовательно, в модели предусмотрено отдельное состояние технического обслуживания системы в скрытом отказе *S*5. При этом из-за ошибочных действий персонала в процессе такого обслуживания система может обратно вернуться в состояние скрытого отказа *S*3.

Техническая эксплуатация средств железнодорожной электросвязи предусматривает формирование и поддержание необходимого количества запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП). Готовность ЗИП в модели предлагается учитывать двумя параметрами: вероятностью отсутствия запасных частей ($P_п$) и временем ожидания ЗИП (*dopvr*). Данные параметры влияют на продолжительность восстановительного ремонта $T_г$. Учет влияния отсутствия ЗИП и времени его доставки реализуется в состоянии *S*2 при выполнении функции подсчета штрафных баллов.

Инциденты, вызванные сбоями и/или неработоспособностью средств ЖДЭ, классифицируются на отказы и технологические нарушения. Положение предусматривает три категории отказов и две категории технологических нарушений, каждая из которых соответствует определенному количеству штрафных баллов $Б_0$. На устранение инцидента отводится среднесетевое время восстановления работоспособности $t_{св}$, регламентируемое Положением. В случае, если фактическое время восстановления $t_ф$ превысило среднесетевое, то итоговая балльная оценка Б вычисляется по формуле

$$Б = Б_0 + 0{,}5 \cdot Б_0 (t_ф - t_{св}) / t_{св}. \qquad (2)$$

Если же восстановление работоспособности средств электросвязи было проведено в течение времени, не превышающего среднесетевое $t_{св}$, то итоговая балльная оценка за инцидент Б равняется $Б_0$.

Таким образом, итоговые балльные оценки Б по всем возникшим инцидентам суммируются и в конце каждого месяца вычисляется удельный показатель качества ТО $Б_у$ в расчете на каждые 100 технических единиц (ТЕ) обслуживаемого оборудования по формуле

$$Б_у = \frac{\sum Б}{T_0/100} = \frac{\sum Б}{T_0} \cdot 100, \qquad (3)$$

где $Б_у$ – удельный показатель качества обслуживания средств связи в штрафных баллах; $\sum Б$ – суммарное количество штрафных баллов по всем инцидентам за месяц; T_0 – техническая оснащенность устройствами электросвязи, ТЕ.

Техническая оснащенность средствами электросвязи T_0 на участках железной дороги измеряется в технических единицах (ТЕ), расчет которых производится в соответствии с действующей методикой определения объема работ региональных центров связи [30].

Далее полученный удельный показатель $Б_у$ в штрафных баллах (ш/б) интерпретируется соответствующей категорией качества: «Отлично» – от 0 до 14,5 ш/б, «Хорошо» – свыше 14,5 ш/б до планируемой величины ш/б (Бп), «Удовлетворительно» свыше Бп до 80 ш/б и «Неудовлетворительно» – свыше 80 ш/б. Планируемая величина штрафных баллов $Б_п$ устанавливается ежемесячно вышестоящей организацией, дирекцией связи. Возможность изменения $Б_п$ введено для управления качеством ТО. Постепенно величина $Б_п$ должна уменьшаться, тем самым стимулируя повышение качества обслуживания средств ЖДЭ.

Следовательно, удельный показатель качества $Б_у$ выступает в качестве оценки эффективности мероприятий по поддержанию оборудования ЖДЭ в работоспособном состоянии, т.е. качества технического обслуживания. Тогда как оценка того, насколько качественно в целом организована эксплуатация средств электросвязи, может быть дана с помощью комплексного показателя надежности – коэффициента готовности $К_Г$. Данный показатель представляет собой отношение времени исправной работы к сумме времен исправной работы и интервалов восстановительного ремонта.

Для рассматриваемой модели коэффициент готовности $К_Г$ рассчитывается по формуле

$$К_Г = \frac{TS_0 + TS_4}{TS_0 + TS_2 + TS_3 + TS_4}, \qquad (4)$$

где TS_0 – суммарное время пребывания в работоспособном состоянии *S*0; TS_2 – суммарное время простоя, обусловленное переходом устройства в состояние *S*2 и выполнением восстановительного ремонта; TS_3, TS_4 – суммарное время пребывания в состояниях скрытого и ложного отказов соответственно.

Таким образом, выполняя статистическое моделирование исследуемого процесса с графом состояний на рис. 1 путем многократной реализации прогонов (испытаний) модели, появляется возможность сбора статистических данных о пребывании системы в каждом состоянии S_i, i = [0, 5]. На основе полученных данных вычисляется оценка коэффициента готовности $К_Г$ в виде среднего значения.

Для реализации имитационной модели выбрана отечественная среда моделирования AnyLogic. Модель в AnyLogic представляет собой набор объектов (инструментов), совместное использование которых позволяет задавать логику протекания различного рода процессов. Для рассматриваемого процесса эксплуатации средств ЖДЭ на рис. 1 применяются инструменты дискретно-событийного моделирования. К таким инструментам в среде AnyLogic версии 7 относятся «Диаграмма состояний» и объект «Событие».

«Диаграмма состояний» (Statechart) представляет собой ориентированный граф конечного автомата с возможностью задания условий, при которых бу-

дет происходить переход, а также набор действий, вызванных сменой состояний. Переходы между состояниями могут происходить в результате истечения заданного тайм-аута, выполнения заданного условия или получения сообщения.

«Событие» служит инструментом для моделирования временных интервалов возникновения событий, чья работа реализуется в трех различных режимах: по тайм-ауту, при выполнении условия, с заданной интенсивностью. В данной работе был использован режим работы с заданной интенсивностью.

Для хранения и обработки данных, получаемых в ходе моделирования, были использованы такие инструменты, как «База данных», «Набор данных» и «Коллекция».

«Коллекция» представляет собой набор данных одного типа, размер которого в отличие от массива может динамически изменяться при моделировании. Для сохранения значений целевых параметров при изменении других, например, модельного времени, по ходу работы модели может использоваться инструмент «Набор данных», являющийся двухмерным массивом конечного размера. По окончании эксперимента его результаты (выходные параметры модели: среднее значение $К_Г$ и $Б_у$) записываются во встроенную базу данных.

Диаграмма состояний в разработанной модели повторяет граф на рис. 1, где моделирование переходов реализуется случайным образом и задается с помощью свойств и дополнительного кода на языке Java в каждом состоянии. В качестве примера рассмотрим алгоритм выполнения кода работоспособного состояния S_0, с которого начинается каждый новый прогон модели. Для наглядности алгоритм работы представлен в виде псевдокода 1.

Псевдокод 1. Алгоритм работоспособного состояния S_0

НАЧ.
  Сгенерировать сл. число $\xi \leftarrow U(0,1)$
  ЕСЛИ: вер-ть перехода из $S0$ в $S2 \geq \xi$
  ТО: Сгенерировать τ
    $TS_0 = TS_0 + \tau$
    Активировать переход в $S2$
  ИНАЧЕ ЕСЛИ: вер-ть перехода из $S0$ в $S4 \geq \xi$
  ТО: Сгенерировать τ
    $TS_0 = TS_0 + \tau$
    Активировать переход в $S4$
  ИНАЧЕ ЕСЛИ: вер-ть перехода из $S0$ в $S3 \geq \xi$
  ТО: Сгенерировать τ
    $TS_0 = TS_0 + \tau$
    Активировать переход в $S3$
  ИНАЧЕ: $TS_0 = TS_0 + T_{ob}$
      Сгенерировать $Tp \leftarrow N(sig*Tp0, Tp0)$
      Активировать переход в $S1$
  ВСЕ
КОН.

В начальный момент времени или при возврате в состояние S_0, в первую очередь, выполняется розыгрыш случайной величины ξ по равномерному закону в интервале от 0 до 1. Далее полученное число последовательно сравнивается с вероятностями перехода из состояния S_0 в возможные состояния S_2, S_4 и S_3. При выполнении одного из условий генерируется значение величины τ, соответствующее интервалу времени в часах, через который произойдет переход, далее сохраняется текущее значение τ в переменной TS_0 и активируется переход, соответствующий выполненному условию.

Инициализация интервала времени τ для экспоненциального закона надежности в соответствии с методом обратного преобразования [31] выполняется по формуле

$$\tau = -\frac{1}{\lambda}\ln(\xi), \qquad (5)$$

где λ – интенсивность отказов, задаваемая при моделировании, 1/ч; ξ – случайное число с равномерным законом распределения в интервале [0, 1].

Выход из состояния S_0 происходит по тайм-ауту через время τ или через задаваемый пользователем интервал периодичности обслуживания T_{ob}, если ни одно из условий псевдокода 1 не выполняется и активируется переход в состояние технического обслуживания S_1. При этом для учета того факта, что в действительности время выполнения профилактических работ по ТО может варьироваться, в псевдокоде 1 переменная T_p инициализируется случайным числом с нормальным распределением с заданными среднеквадратичным отклонением *sig* и математическим ожиданием T_{p0}.

Отдельное внимание в структуре имитационной модели необходимо уделить функции, выполняющей оценку принятого в работе показателя качества технического обслуживания $Б_у$. Этот элемент модели, графическая схема алгоритма которого приведена на рис. 2, реализован в соответствии с уже упомянутым ранее положением «О показателе качества технического обслуживания средств связи». Действия, описанные в алгоритме, выполняются каждый раз, когда система переходит в неработоспособное состояние S_2.

Так как в Положении возможные инциденты с оборудованием ЖДЭ разделяются на три категории отказов и две категории технологических нарушений, то в блоке 1 на рис. 2 выполняется случайный розыгрыш типа инцидента. Для этого генерируется случайное число ξ с равномерным законом распределения в интервале от 0 до 1 и далее последовательно сравнивается с эмпирическими данными о возникновении того или иного инцидента. В текущей реализации модели заданы значения для каждого типа инцидента на основе статистических данных об отказах и нарушениях, произошедших за период с 2014 по 2016 г. в хозяйстве связи одного из участков Западно-Сибирской железной дороги: отказы I категории составляют 0,03; II категории – 0,01; III категории – 0,7 и технологические нарушения I и II категории – по 0,13. Так как рассматривается полная группа несовместных событий, то после проверки ранее сгенерированного случайного числа ξ по всем возможным условиям будет определен тип инцидента, для которого после блока 2 будут выполне-

ны дальнейшие действия, соответствующие именно этому инциденту. Так, например, в случае отказа I категории Положение предусматривает начисление 80 или 40 штрафных баллов $Б_0$ и среднесетевое время восстановления $t_{св}$ в течение 4 или 0,5 ч, поэтому в блоке 3 случайно с вероятностью 0,5 выбирается размер баллов $Б_0$ и время устранения инцидента $t_{св}$.

Фактическое время $t_ф$ устранения инцидента определяется аналогично времени проверки при техническом обслуживании $T_р$, т.е. задается случайным числом с нормальным распределением с тем же самым СКО *sig*, но математическое ожидание инициализируется значением переменной *vrRI* (блок 4). Данный входной параметр задается пользователем и характеризует среднее время ремонта при отказе I категории.

В случае отсутствия необходимого комплекта ЗИП, в блоке 5 на рис. 2 генерируется значение времени ожидания запасных частей $t_{ЗИП}$ в соответствии с нормальным распределением с СКО *sig* и математическим ожиданием $dopvrI_0$. Далее фактическое время устранения инцидента $t_ф$ обновляется в соответствии с необходимым временем ожидания ЗИП.

Следовательно, если фактическое время $t_ф$ превышает среднесетевое время $t_{св}$, то в блоке 6 балльная оценка Б будет вычислена с учетом задержки восстановления работоспособности по формуле (2). Далее в блоке 7 выполняется расчет удельного количества штрафных баллов в соответствии с выражением (3).

Таким образом, моделируя процесс эксплуатации устройств связи в соответствии с графом состояний на рис. 1, имеется возможность сформировать статистические данные о времени пребывания в каждом состоянии *Si*, $i = [0, 5]$ и на их основании дать оценку принятому показателю качества эксплуатации, коэффициенту готовности $К_Г$ по формуле (4), тогда как оценка удельного показателя качества ТО $Б_у$ выполняется с помощью разработанной пользовательской функции при каждом переходе в неработоспособное состояние S_2. Управление процессом моделирования выполняется средствами среды AnyLogic, после запуска модели на выполнение имитация анализируемого процесса начинается автоматически с работоспособного состояния S_0, и далее случайным образом в соответствии с заданными условиями реализуются переходы между состояниями. Один прогон модели выполняется в течение модельного времени *vrpr*, при достижении которого имитация процесса начинается заново с состояния S_0. При этом вычисление оценок выходных параметров модели, коэффициента $К_Г$ и удельного показателя $Б_у$ реализуется раз в месяц по модельному времени, следовательно, если *vrpr* равняется 100 лет, то модель формирует 1200 оценок. Для получения средних значений оценок эксперимент с моделью предполагает выполнение *k*р прогонов с последующим усреднением всех 1200 оценок по всем прогонам. Требуемое количество прогонов *k*р может быть вычислено в соответствии с рекомендациями, приведенными в [32]. В частном случае, при доверительной вероятности, равной 0,95, и доверительном интервале 0,05 каждый эксперимент с моделью требует выполнения 2000 прогонов.

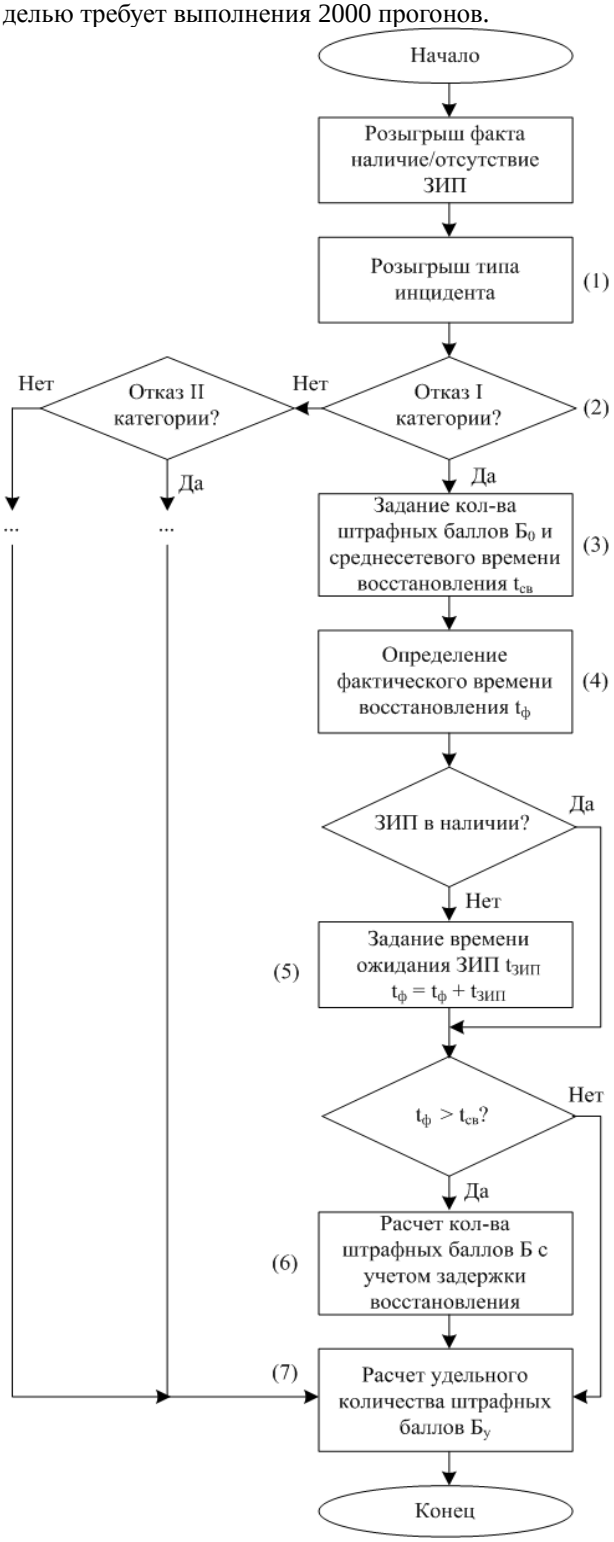

Рис. 2. Графическая схема алгоритма функции оценки качества ТО

Эксперименты с моделью

Для демонстрации работы разработанной имитационной модели был выполнен ряд вычислительных экспериментов, в ходе которых получены гра-

фики оценок коэффициента готовности $К_Г$ (рис. 3, *а*) и линейно аппроксимированные графики оценок показателя качества обслуживания $Б_у$ (рис. 3, *б*) от времени. Цель эксперимента – дать оценку влияния интенсивности отказов устройств на показатели $К_Г$ и $Б_у$. При этом коэффициент готовности $К_Г$ характеризует качество эксплуатации средств связи в целом, тогда как $Б_у$ используется для оценки качества проводимых мероприятий по техническому обслуживанию устройств. Таким образом, было выполнено шесть экспериментов для следующих значений интенсивности отказов λ: 5, 6, 7, 8, 9 и $10 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Значения остальных неизменяемых в ходе эксперимента входных параметров приведены в таблице.

Семейство кривых зависимости оценок коэффициента готовности от времени при различных значениях интенсивности отказов, представленное на рис. 4, *а*, является примером реализации функций коэффициента готовности, полученных экспериментально с помощью разработанной модели.

Как можно наблюдать, полученные экспериментальные кривые нелинейно убывают, начиная с максимально возможного значения, равного единице, что согласуется с принятым в модели допущением о том, что процесс эксплуатации средств ЖДЭ начинается строго с работоспособного состояния *S*0. Данное допущение основывается на функциональном предназначении средств ЖДЭ и их влиянии на безопасность перевозочного процесса, следовательно, для таких устройств период приработки должен быть исключен.

При этом наглядно демонстрируется влияние интенсивности отказов λ на величину коэффициента готовности и как результат на качество организации эксплуатации средств ЖДЭ. Если задаться минимальным допустимым уровнем коэффициента готовности, например 0,99, то в рассматриваемом случае только для интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч оценка коэффициента $К_Г$ по всей оси времени будет отвечать заданным требованиям. Следовательно, можно утверждать о качественной эксплуатации оборудования с параметрами из таблицы и интенсивностью $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Анализируя экспериментальный график зависимости удельного показателя качества технического обслуживания $Б_у$ (см. рис. 3, *б*), можно отметить закономерный рост усредненного значения показателя с увеличением интенсивности отказов для значений 5, 6, 7, 8, 9 и $10 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, составивший в среднем 16,7; 13,3; 14,5; 12,8 и 7,5% соответственно.

Значения входные неизменяемых параметров модели

Параметр	Значение
Математическое ожидание времени ожидания ЗИП при: отказах, $dopvrI_0$ – $dopvrIII_0$ технологических нарушениях, $doptnI_0$, $doptnII_0$, ч	24 12
Вероятность отсутствия ЗИП *QZIP*	0,1
Техническая оснащенность средствами связи $T_о$, т.е.	600
Периодичность технического обслуживания $T_{об}$, ч	8640
Математическое ожидание времени проверки $T_{р0}$, ч	3
Математическое ожидание времени восстановительного ремонта при: отказе первой категории, *vrRI* отказе второй категории, *vrRII* отказе третьей категории, *vrRIII* технологическом нарушении первой и второй категории, *vrRtnI* и *vrRtnII*, ч	 10 5 2,5 1,25
Вероятность ошибки обслуживающего персонала, $E_{ор}$	0,126
Вероятность ошибки первого рода встроенных средств диагностики, a_1	0,01
Вероятность ошибки первого рода внешних средств диагностики, a_2	0,005
Вероятность ошибки второго рода встроенных средств диагностики, b_1	0,02
Вероятность ошибки второго рода внешних средств диагностики, b_2	0,05
Количество прогонов *k*р	2000
Время одного прогона *vrpr*, лет	100

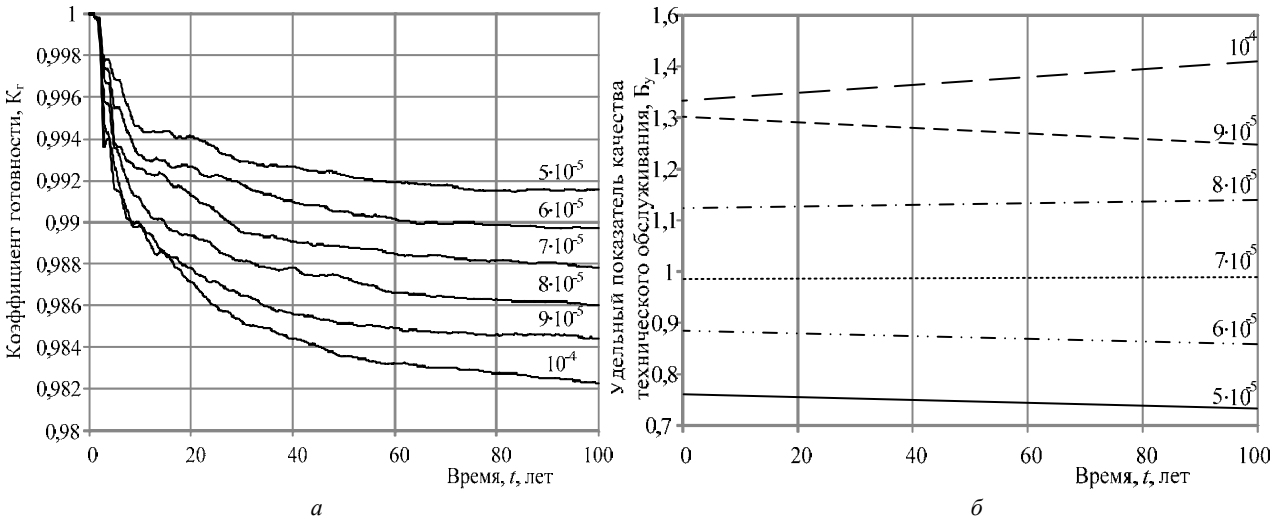

Рис. 3. Экспериментальный график зависимости оценок коэффициента готовности $К_Г$ (*а*) удельного показателя качества ТО $Б_у$ (*б*) от времени *t* и интенсивности отказов λ

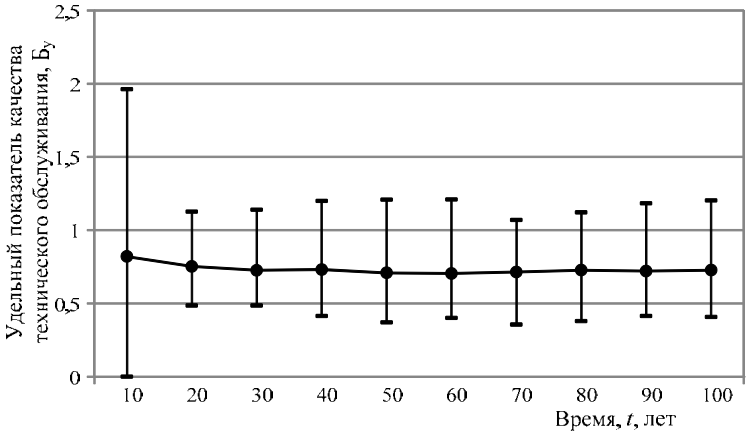

Рис. 4. Изменение среднего значения $Б_у$ и его максимальной и минимальной величины для интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч

На рис. 4 представлены график среднего значения удельного показателя качества $Б_у$, а также его максимальные и минимальные значения за соответствующий период времени для интенсивности отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Согласно положению «О показателе качества технического обслуживания средств связи», можно утверждать, что при заданных параметрах модели достигается наивысшая категория качества «Отлично», так как во всех точках максимальное значение не превышает порог в 14,5 штрафных балла.

Заключение

Анализ качества эксплуатации оборудования, участвующего в организации ответственных технологических процессов в промышленности и на транспорте, остается актуальной задачей. Применение современных программных средств, позволяющих автоматизировать процесс расчета показателей качества, обладает неоспоримым преимуществом, заключающимся в оперативном получении результатов компьютерного моделировании в сравнении с натурными испытаниями и (или) опытными данными эксплуатации. Однако это требует разработки адекватных математических моделей, чья точность сопоставима с результатами расчетов на основе реальных опытных данных.

В данной работе предложена имитационная модель процесса эксплуатации устройств железнодорожной электросвязи, предназначенная для оценки удельного показателя качества технического обслуживания средств связи и коэффициента готовности как показателя качества процесса эксплуатации в целом. В основу модели положен принцип дискретно-событийного моделирования, что облегчает ее реализацию в среде AnyLogic с помощью встроенных инструментов. Разработанная модель учитывает возникновение внезапных, скрытых и ложных отказов устройств, влияние готовности комплектов ЗИП, ошибочных действий обслуживающего персонала, а также периодичности и продолжительности ТО и ремонта.

С помощью предлагаемой модели появляется возможность проведения компьютерного эксперимента с целью анализа влияния входных параметров на коэффициент готовности и удельный показатель качества технического обслуживания. Таким образом, разработанная модель может выступать в качестве инструмента поддержки принятия решений, например, при совершенствовании системы технического обслуживания уже используемого и (или) вновь внедряемого оборудования электросвязи.

В дальнейшем планируется усовершенствование разработанной модели с целью учета постепенных отказов компонентов оборудования железнодорожной электросвязи, а также изменяемой в процессе эксплуатации периодичности технического обслуживания.

Литература

1. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте: учеб. / Г.В. Горелов, А.Ф. Фомин, А.А. Волков и др. – М.: УМЦ ЖДТ, 2013. – 532 с.

2. Сапожников Вл.В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / Вл.В. Сапожников и др.; под ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: УМЦ ЖДТ, 2017. – 318 с.

3. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту объектов железнодорожной электросвязи ОАО «Российские железные дороги», от 26 октября 2017 г. № 2185р [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=708469#03937885506746581, свободный (дата обращения: 07.10.2018).

4. Богданов А.А. Оценка качества эксплуатации и технического обслуживания в региональном центре связи с помощью инструмента Anylogic 7 / А.А. Богданов, А.А. Любченко // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2017. – №2. – С. 3–8.

5. Держо Г.Г. Количественная оценка вклада систем связи в безопасность технологических процессов на железнодорожном транспорте. – М.: УМЦ ЖДТ, 2007. – 130 с.

6. Шерстнева О.Г. Расчет вероятностей ошибок контроля в процессе технического обслуживания цифровых систем коммутации // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т. 5, № 2. – С. 38–41.

7. Полетаев В.П. Определение оптимальной периодичности профилактики скрытых отказов / В.П. Полетаев, Д.А. Богданов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 3. – С. 9–13.

8. Полетаев В.П. Применение автоматизированного комплекса для оценки состояния технических систем со скрытыми отказами / В.П. Полетаев, Д.А. Богданов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3(15). – С. 80–84. doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-12

9. Реутов В.Г. Проблемы оценки показателей надежности сложных систем / В.Г. Реутов, Д.А. Шеломанов // Приборы и системы. управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 7. – С. 47–52.

10. Острейковский В.А. Теория надежности: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.

11. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек–техника. – М.: Машиностроение, 1983. – 263 с.

12. Черкесов Г.Н. Оценка надежности с учетом ЗИП: учеб. пособие / Г.Н. Черкесов – СПб.: БВХ-Петербург, 2012. – 480 с.

13. Жданов В.В. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП / В.В. Жданов, Д.К. Авдеев, А.Н. Тихменев // Надежность. – 2011. – № 3(38). – С. 53–60.

14. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.

15. Научно-методические основы управления надежностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта / В.К. Котов, В.Р. Антонец, Г.П. Лабецкая, В.В. Шмытинский. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012. – 193 с.

16. Емельянов В.Е. Оценка качества технического обслуживания средств РТОП и ЭС / В.Е. Емельянов, С.Н. Смородский // Научный вестник Моск. гос. техн. ун-та гражданской авиации. – 2015. – № 219(9). – С. 41–45.

17. Модель для расчета показателей качества функционирования системы технического обслуживания и ремонта сети связи / В.Л. Витюк, В.Л. Гузенко, Е.А. Миронов и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 5-3. – С. 493–498.

18. Коваленко В.Н. Контроль качества и надежности технического обслуживания и ремонтов / В.Н. Коваленко, Д.Ю. Зайцев, Д.Г. Неволин // Транспорт Урала. – 2016. – № 3(50). – С. 43–47. doi: 10.20291/1815-9400-2016-3-43-47

19. Якубович А.Н. Эффективный алгоритм численной реализации случайных величин в задачах статистического моделирования надежности технических систем / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 8. – С. 84–89.

20. Якубович А.Н. Определение надежности автотранспортных систем и их элементов методами математического моделирования / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Грузовик. – 2016. – № 7. – С. 39–44.

21. Якубович А.Н. Оценка надежности автотранспортных систем методами статистического моделирования (аналитический обзор) / А.Н. Якубович, И.А. Якубович, В.И. Рассоха // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 1. – С. 89–94.

22. Тихменев А.Н. Прогнозирование надежности структурно-сложных радиоэлектронных средств методами имитационного моделирования / А.Н. Тихменев, В.В. Жаднов // Качество. Инновации. Образование. – 2013. – № 3. – С. 50–56.

23. Чернов А.В. Оценка надежности программного обеспечения методами дискретно-событийного моделирования / А.В. Чернов, А.Н. Гуда, С.В. Чубейко, М.А. Бутакова // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4. – С. 158–165. doi: 10.15827/0236-235X.112.158-165

24. Максимей И.В. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц, Е.А. Ерофеева // Математические машины и системы. – 2008. – № 4. – С. 147–153.

25. Алексеев С.И. Имитационно-анимационное моделирование основных технологических процессов Мурманского транспортного узла / С.И. Алексеев, В.В. Береженой, Р.И. Сорока // Евразийское пространство: приоритеты социально-экономического развития. – 2011. – С. 28–36.

26. Любченко А.А. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic / А.А. Любченко, С.В. Бартош, В.А. Смирнов, P. Á. Castillo // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 4, № 1. – С. 87–92.

27. Якимов И.М. Моделирование сложных систем в имитационной среде AnyLogic / И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2014. – Т. 17, № 13. – С. 352–357.

28. Рахмангулов А.Н. Особенности построения имитационной модели технологии работы железнодорожной станции в системе AnyLogic / А.Н Рахмангулов, П.Н. Мишкуров // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 7–13.

29. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БВХ-Петербург, 2008. – 704 с.

30. Об утверждении методики определения объема работ региональных центров связи (для исчисления производительности труда работников, занятых на перевозках) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://jd-doc.ru/2012/mart-2012/1888-ot-7-marta-2012-g-n-478r, свободный (дата обращения: 11.06.2018).

31. Финаев В.И. Аналитические и имитационные модели: учеб. пособие / В.И. Финаев, Е.Н. Павленко, Е.В. Заргарян. – Таганрог: Изд-во Технол. ин-та ЮФУ, 2007. – 310 с.

32. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 420 с.

Любченко Александр Александрович
Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникационных, радиотехнических систем и сетей (ТРСиС)
Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)
Маркса пр-т, д. 35, г. Омск, Россия, 644046
http://orcid.org/0000-0002-2768-484X
Тел.: +7-960-998-97-04
Эл. почта: allyubchenko@gmail.com

Копытов Евгений Юрьевич
Канд. техн. наук, доцент каф. ТРСиС ОмГУПС
Маркса пр-т, д. 35, г. Омск, Россия, 644046
Тел.: (381-2) 31-16-72
Эл. почта: jenya87@list.ru

Богданов Александр Александрович
Студент каф. ТРСиС ОмГУПС
Маркса пр-т, д. 35, г. Омск, Россия, 644046
Тел.: +7-950-338-99-11
Эл. почта: Alex-b0g@yandex.ru

Lyubchenko A.A., Kopytov E.Y., Bogdanov A.A.

Statistical modeling of quality measures of operation and preventive maintenance of railway telecommunication equipment in AnyLogic

Telecommunication equipment is a functional subsystem of railway transport which safety and efficiency are totally dependent on the reliable operation of utilized communication devices. Preventive maintenance is one of the most popular methods of ensuring the required reliability level of the technological equipment on railways. The efficiency assessment of maintenance procedures implementation is done using the approved quality indicator of preventive maintenance. Whereas the availability coefficient is used for the quality estimation of the whole exploitation process. Generally, the calculation of the mentioned measures is performed on the basis of the statistical data about occurred failures. This method is characterized by significant advantages as well as obvious disadvantages in case of the lack or constrained obtaining of empirical data. Modern computer technologies allow automating and simplifying the estimation of the target quality indicators. However, it requires the development of a proper mathematical support for such analysis. In the paper, we propose a simulation model of the operational process of railway telecommunication equipment with the opportunity of the estimation of the availability coefficient and the quality indicator of preventive maintenance in automated mode. The model takes into account sudden, fictitious and latent failures, impact of spare parts availability and erroneous actions of service staff during maintenance, as well as periodicity and length of maintenance and repair for quality measures estimation. The model is built using the discrete-event approach with AnyLogic.

Keywords: railway telecommunications, quality, availability, AnyLogic.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-98-108

References

1. Gorelov G.V., Fomin A.F., Volkov A.A., Kotov V.K., Romashkova O.N. *Teoriya peredachi signalov na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik* [Theory of signal transmission in rail transport: textbook]. Moscow, UMC GDT, 2013. 532 p.

2. Sapognikov Vl.V. et al. *Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Reliability of railway systems of automation, telemechanic and communication]. Moscow, UMC GDT, 2017. 318 p.

3. Repair and maintenance instructions for railway telecommunication systems of OAO «RZD», 26/10/2017 № 2185 p. [Free online resource]. – Available at: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=708469#03937885506746581, (accessed November 07, 2018).

4. Bogdanov A.A., Lyubchenko A.A. Assessment of operation and maintenance quality in regional communication centre using AnyLogic 7. *Rossiya molodaya: peredovye tehnologii – v promyshlennost'*, 2017, no. 2, pp. 3–8 (in Russ.).

5. Derzho G.G. *Kolichestvennaya ocenka vklada sistem svyazi v bezopasnost' tekhnologicheskih processov na zheleznodorozhnom transporte: Monografiya* [Quantitative analysis of contribution of telecommunications on technological processes safety in rail transport: monograph]. Moscow, UMC GDT, 2007. 130 p.

6. Sherstneva O.G. Probability calculation of control errors during maintenance of digital transmission switches. *Infocomm technologies*, 2007, no. 2, iss. 5, pp. 38–41 (in Russ.).

7. Poletaev V.P., Bogdanov D.A. Determination of the preventive maintenance optimal frequency of hidden failures. *Information technology of CAD/CAM/CAE*, 2009, no. 3, pp. 9–13 (in Russ).

8. Poletaev V.P., Bogdanov D.A. Application of automated complex for the state estimation of technical systems with latent failures. *Reliability and quality of complex system*, 2016, no. 3(15), pp. 80–84 (in Russ). DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-12.

9. Reutov V.G., Shelomanov V.G. Reliability estimation problems of complex systems. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2016, no. 7, pp. 47–52 (in Russ).

10. Ostrejkovskij V.A. *Teoriya nadezhnosti: uchebnik dlya vuzov* [Reliability theory: textbook for higher education institutions]. Moscow, Vysshaya shkola publishers, 2005. 463 p.

11. Shibanov G.P. *Kolichestvennaya ocenka deyatel'nosti cheloveka v sistemah chelovek-tekhnika* [Human activity quantitative estimation in human-machine systems]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 463 p.

12. Cherkesov G.N. *Ocenka nadezhnosti s uchetom ZIP* [Reliability calculation with respect to spare parts]. Saint Petersburg, BVH-Peterburg, 2012. 480 p.

13. Gdanov V.V., Avdeev D.K., Tihmenev A.N. Problems of sufficiency and optimization indices calculation of spare parts supply. *Reliability*, 2011, no. 3, iss. 38, pp. 53–60 (in Russ.).

14. GOST R 53111–2008. *Ustojchivost' funkcionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki* [Operation stability of public communication networks. Requirments and test procedures]. Moscow, Standartinform, 2009. 19 p.

15. Kotov V.K., Antonec V.R., Labeckaya G.P., SHmytinskij V.V. *Nauchno-metodicheskie osnovy upravleniya nadezhnost'yu i bezopasnost'yu ehkspluatacii setej svyazi zheleznodorozhnogo transporta: monografiya* [Scientific methodical basics of reliability and safety control of the telecommunication networks operation in railway transport: monograph]. Moscow, UMC GDT, 2012. 193 p.

16. Emelyanov V.E., Smorodskiy S.N. Quality assessment maintenance of FRTS and ES. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2015, no. 219(9), pp. 41–45 (in Russ.).

17. Vityuk V.L., Guzenko V.L., Mironov E.A., Sevastiyanov D.A., Shestopalova O.L. Model for calculating parameters of functioning quality of repair and maintenance of communications network. *Fundamental research*, 2016, no. 5-3, pp. 493–498 (in Russ).

18. Kovalenko V.N., Zaytcev D.Y., Nevolin D. G. Quality and reliability control for maintenance and repair. *Transport Urala*, 2016, no. 3(50), pp. 43–47 (In Russ.). DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-43-47

19. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A. Efficient algorithm for numerical implementation of random variables in statistical modeling of technical systems reliability. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2016, no. 8, pp. 84–89 (in Russ.).

20. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A. The determination of the reliability of transport systems and their elements using mathematical modelling. *Gruzovik*, 2016, no. 7, pp. 39–44 (in Russ.).

21. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A., Rassokha V.I. Reliability evaluation of transport systems by statistical modeling methods (analytical review). *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, 2016, no. 1, pp. 89–94 (in Russ.).

22. Tikhmenev A.N., Zhadnov V.V. Reliability prediction structural-difficult electronic devices by methods of imitating

modelling. *Quality. Innovation. Education*, 2013, no. 3, pp. 50–56 (in Russ.).

23. Chernov A.V., Guda A.N., Chubeyko S.V., Butakova M.A. Software realiability evaluation by discrete-event simulation methods. *Programmnye Produkty i Sistemy*, 2015, no. 4, pp. 158–165 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.112.158-165.

24. Maksimey I.V., Sukach E.I., Giruts P.V., Erofeeva E.A. Simulation modelling of probabilistic characteristic of railway network operation. *Mathematical machines and systems*, 2008, no. 4, pp. 147–153 (in Russ.).

25. Alekseev S.I., Berezhnoy V.V., Soroka R.I. Imitacionno-animacionnoe modelirovanie osnovnyh tehnologicheskih processov murmanskogo transportnogo uzla [Imitated-animated simulation of the basic technological processes the Murmansk transport hub]. Evrazijskoe prostranstvo: prioritety social'no-jekonomicheskogo razvitija. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [*Eurasian area: priorities of socio-economic development*. Proc. of the international conference]. Moscow, MGIU Publ., 2011, vol. I, pp. 28–36.

26. Lyubchenko A.A., Bartosh S.V., Smirnov V.A., Castillo P.Á. Discrete-event model of railway junction in AnyLogic. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 87–92 (in Russ.).

27. Yakimov I.M., Kirpichnilov A.P., Mokshin V.V. Modelirovanie slozhnyh sistem v imitacionnoj srede AnyLogic. *Herald of Kazan Technological University*. 2014, vol. 17, no. 13, pp. 352–357 (in Russ.).

28. Rakhmangulov A.N., Mishkurov P.N. Special aspects of railroad station working method simulation model development within AnyLogic system. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education*. 2012, no. 4, iss. 2, pp. 7–13 (in Russ.).

29. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Basics of reliability theory]. Saint-Petersburg: BVH-Peterburg, 2008. 704 p.

30. About approval of the procedure of effort estimation of regional communication centers (for the calculus of labor efficiency of the employees, occupied in transportation) [Free online resource]. – Available at: https://jd-doc.ru/2012/mart-2012/1888-ot-7-marta-2012-g-n-478r (accessed June 11, 2018).

31. Finaev V.I., Pavlenko E.N., Zargaryan E.V. *Analiticheskie i imitacionnye modeli: uchebnoe posobie* [Analytical and simulation models: tutorial]. Taganrog, Publisher of Technological institute YuFU, 2007. 310 p.

32. Shennon R. *Imitacionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Systems simulation: the art and science]. Moscow, Mir, 1978. 420 p.

Alexander A. Lyubchenko
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Department of Telecommunications, Radio System
and Networks, Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx pr., Omsk, Russia, 644046
http://orcid.org/0000-0002-2768-484X
Phone: +7-960-998-97-04
Email: allyubchenko@gmail.com

Evgeny Y. Kopytov
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Department of Telecommunications, Radio System
and Networks, Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx pr., Omsk, Russia, 644046
Phone: (381-2) 31-16-72
Email: jenya87@list.ru

Alexander A. Bogdanov
Student, Department of Telecommunications, Radio System
and Networks, Omsk State Transport University (OSTU)
35, Marx pr., Omsk, Russia, 644046
Phone: +7-950-338-99-11
Email: Alex-b0g@yandex.ru