

Научная статья

УДК 621.39

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52>

EDN:CFAOSQ



# Имитационная модель полумарковского типа для исследования надежности устройств TSN при работе в сетях связи железнодорожного транспорта

Andrey Konstantinovich Kanaev, kanaev@pgups.ru

Artem Igorevich Alekseev, alekseevartem.ig@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация

## Аннотация

**Актуальность:** технология сетей TSN является перспективным и активно разрабатываемым институтом IEEE направлением, которое дает возможность эффективно использовать стандарт Ethernet для надежной своевременной передачи трафика разного характера и различной степени критичности к задержкам.

**Цель:** разработка имитационной полумарковской модели для исследования надежности устройств TSN, позволяющей гибко оценивать вероятностные характеристики надежности и их изменения в динамике.

**Методы:** имитационное моделирование с использованием языка программирования Python, а также методы теории марковских и полумарковских процессов, методы обработки данных временных рядов.

**Результаты:** разработана полумарковская модель, благодаря которой можно учесть сложные неявные зависимости между прошлыми состояниями устройства и текущими вероятностями переходов, разработан вариант сценария работы модели, включающий в себя набор различных влияющих факторов, а также показано, что предлагаемая модель позволяет получать динамическую картину изменения показателей надежности устройства, отличную от результатов, получаемых с помощью традиционных аналитических подходов. Кроме того, произведена верификация результатов имитационного моделирования, определен метод их сглаживания и обоснован его выбор, а также показана весьма малая величина отклонения статистических результатов имитационной модели от аналитических.

**Новизна** заключается в отличии предлагаемого подхода к оценке показателей надежности устройств, основанного на статистическом имитационном моделировании, от классических методов, а также создании комплексных многофакторных сценариев поведения устройства.

**Практическая значимость:** результаты работы показывают возможность применения имитационного моделирования для прогнозирования в задачах надежности, динамического учета с его помощью сложных процессов деградации и восстановления устройства в ходе эксплуатации и, таким образом, могут быть в дальнейшем использованы при оценке показателей надежности различных телекоммуникационных и других технических устройств.

**Ключевые слова:** чувствительные ко времени сети, сети Ethernet, надежность сетей связи, имитационное моделирование, марковские цепи, полумарковские цепи

**Ссылка для цитирования:** Канаев А.К., Алексеев А.И. Имитационная модель полумарковского типа для исследования надежности устройств TSN при работе в сетях связи железнодорожного транспорта // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 43–52. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52. EDN:CFAOSQ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52>

EDN:CFAOSQ

# Semi-Markov Type Simulation Model for Studying the Reliability of TSN Devices When Operating in Railway Communication Networks

Andrey K. Kanaev, kanaev@pgups.ru  
Artem I. Alekseev, alekseevartem.ig@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
St. Petersburg, 190031, Russian Federation

## Annotation

**Relevance:** *TSN technology is a promising direction of the Ethernet standard actively developed by IEEE which allows Ethernet to be effectively used for reliable timely transmission of traffic of various types and varying degrees of delay criticality.*

**Purpose:** *development of a semi-Markov simulation model for studying the reliability of TSN devices which allows to flexibly estimate probabilistic reliability characteristics and their dynamical changes.*

**Methods:** *simulation modeling in Python programming language, methods of the theory of Markov and semi-Markov processes, methods of time series data processing.*

**Results:** *a semi-Markov model has been developed that allows considering complex implicit dependencies between past device states and current transition probabilities; a variant of the model's operation scenario has been developed that includes a set of various influencing factors, and it has also been shown that the proposed model provides a dynamic view of device reliability parameters changes that differs from the results obtained using traditional analytical approaches. In addition, the simulation results have been verified, the smoothing method has been chosen and its choice has been justified, and a very small deviation of the statistical results of the simulation model from the analytical ones has been shown.*

**Novelty:** *the novelty lies in the difference between classical methods and the proposed approach to estimating device reliability parameters based on statistical simulation, as well as in the creation of complex multifactorial scenarios of device behavior.*

**Practical significance:** *the results of the work show the possibility of using simulation modeling for forecasting reliability problems, dynamically accounting for complex processes of degradation and restoration of a device during operation and, thus, can be further used in estimating the reliability parameters of various telecommunications and other technical devices.*

**Keywords:** *time-sensitive networking, Ethernet networks, communication networks reliability, simulation modeling, Markov chains, semi-Markov chains*

**For citation:** Kanaev A.K., Alekseev A.I. Semi-Markov Type Simulation Model for Studying the Reliability of TSN Devices When Operating in Railway Communication Networks. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2025;11(6):43–52. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-43-52. EDN:CFAOSQ

## Введение

Безопасность является одним из ключевых требований, предъявляемых к перевозочному процессу на железнодорожном транспорте. Это обуславливает повышенное внимание, уделяемое вопросам надежности всех технических систем, применяемых при его осуществлении. Технологические сети связи железнодорожного транспорта являются одной

из таких систем и также требуют бесперебойного функционирования при передаче различной критической информации [1, 2]. На сегодняшний день основой построения технологической сети связи остаются системы синхронной цифровой иерархии, обеспечивающие коммутацию каналов, объединяемых в цифровые потоки различного уровня. Эти системы ориентированы главным образом на фор-

мирование типовых каналов с постоянной пропускной способностью, достаточной для передачи голосовой информации [2].

Вместе с тем постоянно расширяется сегмент, использующий пакетную передачу информации и включающий, в частности, сети передачи данных и IP-телефонии. К недостаткам традиционных технологий пакетной коммутации, ограничивающим их применение в ответственных областях, таких, как, например, оперативно-технологическая связь, относят не в полной мере высокую надежность и неопределенность задержек доставки информации [3]. Однако в настоящее время существует ряд решений, позволяющих преодолеть эти недостатки пакетных сетей. Одним из таких решений является технология сетей, чувствительных ко времени (TSN, *аббр. от англ.* Time-Sensitive Networking), разрабатываемая институтом IEEE.

В рамках технологии TSN, расширяющей классический Ethernet, предлагаются механизмы классификации и контроля трафика, управления задержками, строгой синхронизации и обеспечения резервирования. Все вместе они призваны обеспечить возможность передачи в сетях Ethernet критической информации с гарантированно низкими задержками и высокой достоверностью доставки. Этот факт делает данную технологию потенциально применимой в пакетных сетях технологической связи железнодорожного транспорта, что было более подробно рассмотрено в [4].

Основой достижения высокой надежности в сетях TSN является механизм дублирования кадров (FRER, *аббр. от англ.* Frame Replication and Elimination for Reliability), определяемый стандартом 802.1CB [5]. Сами по себе отдельные сетевые устройства TSN в данном стандарте не рассматриваются, поэтому в отношении них могут быть применены общие подходы теории надежности, в рамках которой поведение технического устройства чаще всего характеризуется потоком отказов, подчиняющимся экспоненциальному закону с данной интенсивностью. При этом обычно предполагается, что в течение всего периода эксплуатации эта интенсивность постоянна, а старение в этот период не оказывается на надежности устройства [1, 6].

Такое представление, однако, может быть несколько ограниченным в контексте современных телекоммуникационных устройств, являющихся, в сущности, сложными компьютерными системами. К таковым, среди прочего, относятся и сетевые устройства TSN. Поэтому целью настоящей работы является разработка детализированной модели, которая позволяла бы комплексно и динамически учитывать различные факторы, влияющие на изменение показателей надежности устройства TSN.

Актуальность работы, таким образом, обуславливается, с одной стороны, потенциальной применимостью технологии TSN для модернизации технологических сетей связи железнодорожного транспорта, и, с другой стороны, ограниченностью традиционных моделей надежности технических устройств.

### Методы, применяемые при построении модели

В работе используется имитационный подход к моделированию в сочетании с аппаратом марковских и полумарковских процессов. Разрабатываемая модель является продолжением и расширением ранее выполненной работы, представленной в [7]. В ней были предложены два варианта расширенного множества состояний, характеризующего сетевое устройство TSN с точки зрения надежности, и построены соответствующие графы переходов, представленные на рисунке 1, где 1 – исправное состояние (рисунок 1а) / исходное состояние (рисунок 1б); 2 – отказ ПО; 3 – критический отказ ПО; 4 – аппаратный отказ; 5 – критический аппаратный отказ; 6 – послеремонтное состояние (рисунок 1б).

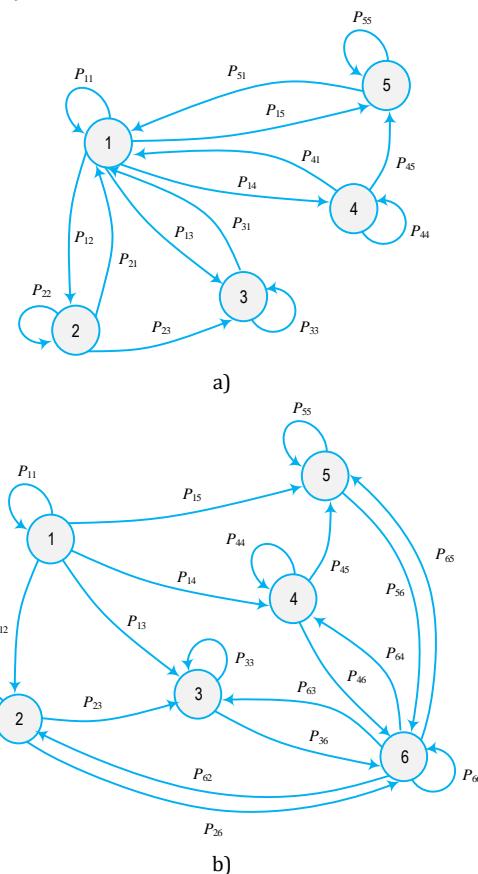


Рис. 1. Варианты графа переходов марковской цепи, характеризующей устройство TSN: без учета (а) и с учетом (б) послеремонтного состояния

Fig. 1. Variants of the Transition Graph of the Markov Chain Describing a TSN Device: without (a) and with (b) Post-Repair State

В качестве показателя надежности устройства в модели рассматривались вероятности его исправного состояния в различные моменты времени. Также был представлен алгоритм работы имитационной марковской модели, приведены результаты ее реализации и выполнена верификация с помощью аналитического расчета. Основным результатом работы является подтверждение соответствия поведения предлагаемой имитационной модели расчетным результатам.

В модели [7], в соответствии с марковским свойством процесса, вероятности переходов между состояниями остаются неизменными, а будущее состояние системы зависит только от текущего ее состояния, но не от пути попадания в него [8, 9]. В настоящей работе предлагается расширение модели за счет включения в нее функции пересчета вероятностей в зависимости от тех или иных условий. Это изменение нарушает марковское свойство, вводя зависимость между текущими вероятностями смены состояния и последовательностью прошлых переходов, поэтому новая модель будет не марковской, а полумарковской.

Включение в модель такой зависимости позволяет учесть влияние различных факторов на бесперебойность работы устройства на каждом шаге модели и, таким образом, сформировать динамическую картину изменения показателей надежности. Например, можно учесть следующие явления:

- старение и износ системы как постепенный процесс, распределенный во времени;
- постепенное снижение вероятности исправного состояния системы после многократных ремонтов;
- повышение вероятности перехода отказа в критический в случае, если он не был устранен достаточно оперативно;
- повышение вероятности программных ошибок непосредственно после обновления программного обеспечения;
- повышение вероятности устранения отказа в случае, если он не устранен в течение длительного времени и для восстановления системы привлекаются дополнительные силы;
- повышение вероятности отказов исправного устройства TSM при его работе в цепочке с отказавшим (возникновение зависимых отказов).

Таким образом, введение в модель условий изменения вероятностей переходов позволяет в динамике рассмотреть различные сценарии поведения устройства и влияния на него тех или иных факторов. Имитационный характер модели, в свою очередь, дает возможность статистически получить вероятностные характеристики надежности с учетом введенных неявных зависимостей, которые трудно отразить в традиционных аналитических моделях.

## Методы, применяемые при построении модели

Как видно из работы [7], в некоторых точках статистически полученные вероятности исправности устройства значительно отклоняются от аналитической кривой, что придает результатам моделирования зашумленный вид и затрудняет их интерпретацию. Вместе с тем относительно небольшое увеличение объема выборки (с 1000 до 5000 реализаций), как показали пробные расчетные эксперименты, все еще не позволяет в достаточной степени уменьшить отклонения. Дальнейшее же ее увеличение (до 10000 и более реализаций) приводит к значительному увеличению времени моделирования и затрудняет ее многократный запуск при варьировании входных данных. Поэтому в рамках текущей работы предлагается выбрать подходящий метод обработки результатов, чтобы даже при относительно небольшом объеме выборки иметь возможность получить графики с приемлемой степенью отклонения. Затем выбранным способом предлагается обработать имеющиеся результаты [7], чтобы на их примере проверить эффективность сглаживания и оценить точность выбранного метода моделирования. Это позволит далее обоснованно считать достоверными результаты, получаемые в рамках расширенной модели и обработанные аналогичным образом.

В качестве способа сглаживания статистических данных выбрано простое скользящее среднее. Оно удобно для реализации в рамках построенной модели, так как вычисляется по простой формуле для каждого элемента временного ряда. Кроме того, в отличие от регрессионных моделей, такое сглаживание не требует выбора вида кривой, характеризующей зависимость, и с достаточной общностью может применяться при варьированих входных данных, даже если они значительно изменят получаемый статистический результат.

Для вычисления скользящего среднего в случае нечетного размера интервала сглаживания используется формула [10]:

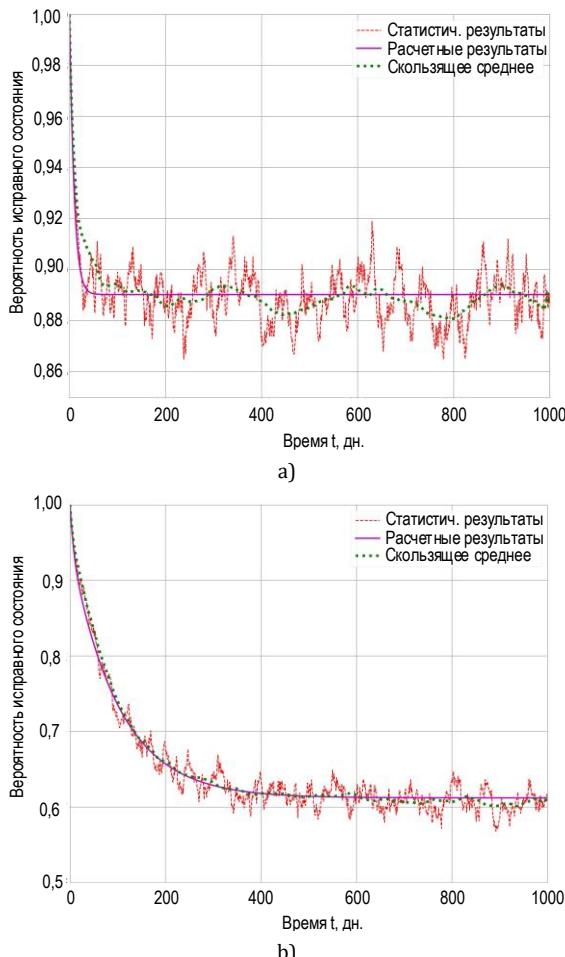
$$\bar{p}_{i+m} = \frac{\sum_{k=0}^{2m} p_{i+k}}{2m + 1}, \quad (1)$$

где  $\bar{p}_{i+m}$  – скользящее среднее, соответствующее  $(i + m)$ -му элементу ряда, лежащему в середине интервала сглаживания,  $i \geq 1$ ;  $p_{i+k}$  – суммируемые значения временного ряда, лежащие в пределах интервала сглаживания;  $2m + 1$  – размер интервала (окна) сглаживания.

Следует отметить, что скользящее среднее с данным интервалом сглаживания нельзя вычислить для первых и последних  $m$  значений ряда. В то же время, так как получаемый ряд содержит большое количество элементов, для его сглажива-

ния необходим выбор интервала значительной величины, и отбрасывание начальных и конечных элементов ряда сделает результат несколько неполным. По этой причине предлагается использовать укороченный интервал для первых значений ряда, постепенно увеличивая его вплоть до выбранной величины  $2m + 1$ , и, аналогично, уменьшать его при приближении к концу ряда.

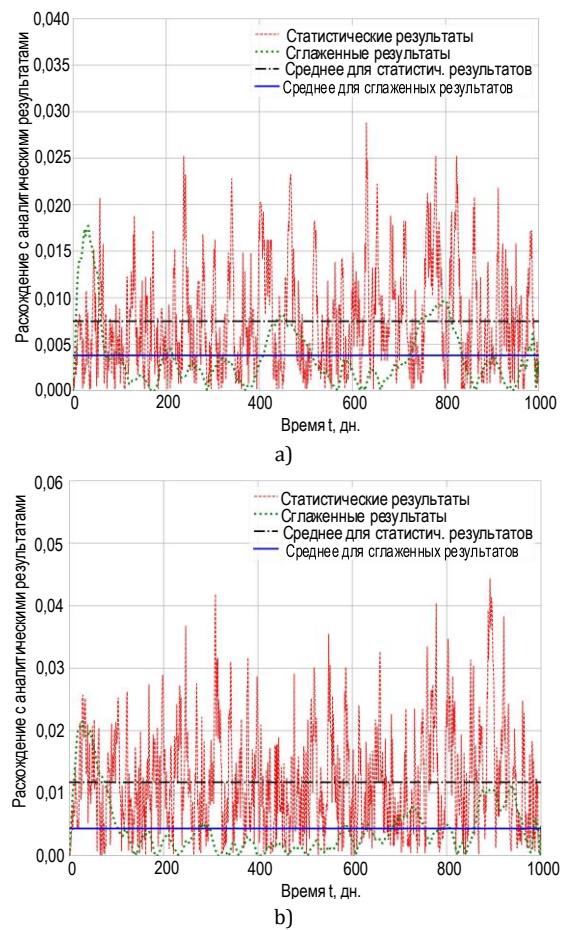
На рисунке 2 представлены результаты сглаживания статистических графиков вероятности исправного состояния устройства. Они получены с помощью модели [7] при тех же исходных данных для двух вариантов графа переходов, приведенных на рисунке 1. Величина интервала сглаживания для скользящего среднего выбрана равной 109. Из представленных графиков видно, что сглаживание значительно снижает случайные отклонения от среднего для вероятности, вычисленной по результатам моделирования, и приближает ее к расчетным значениям.



**Рис. 2. Результаты сглаживания статистических вероятностей, полученных с помощью имитационной марковской модели для случаев: без учета (а) и с учетом (б) послеремонтного состояния**

*Fig. 2. Results of Statistical Probabilities Smoothing Got with the Markov Simulation Model for Cases: without (a) and with (b) Post-Repair State*

На рисунке 3 приведены графики модуля расхождения исходных и сглаженных значений вероятности со значениями, полученными аналитически (вновь для двух вариантов графа переходов). Также на графиках показаны средние значения расхождения для несглаженных и сглаженных результатов. Для варианта, представленного на рисунке 3а, эти значения составляют соответственно 0,0076 и 0,0036, а для варианта на рисунке 3б – 0,0113 и 0,0045. Кроме того, из общего поведения графиков видно, что в обоих случаях сглаженные результаты лежат значительно ниже необработанных, и, за вычетом всплесков в начале и конце ряда, не превышают среднего отклонения исходных статистических данных.



**Рис. 3. Расхождение по модулю статистических (несглаженных и сглаженных) результатов моделирования с аналитическими для случаев: без учета (а) и с учетом (б) послеремонтного состояния**

*Fig. 3. Difference between Statistical (Unsmoothed and Smoothed) and Analytical Modeling Results in Absolute Values for Cases: without (a) and with (b) Post-Repair State*

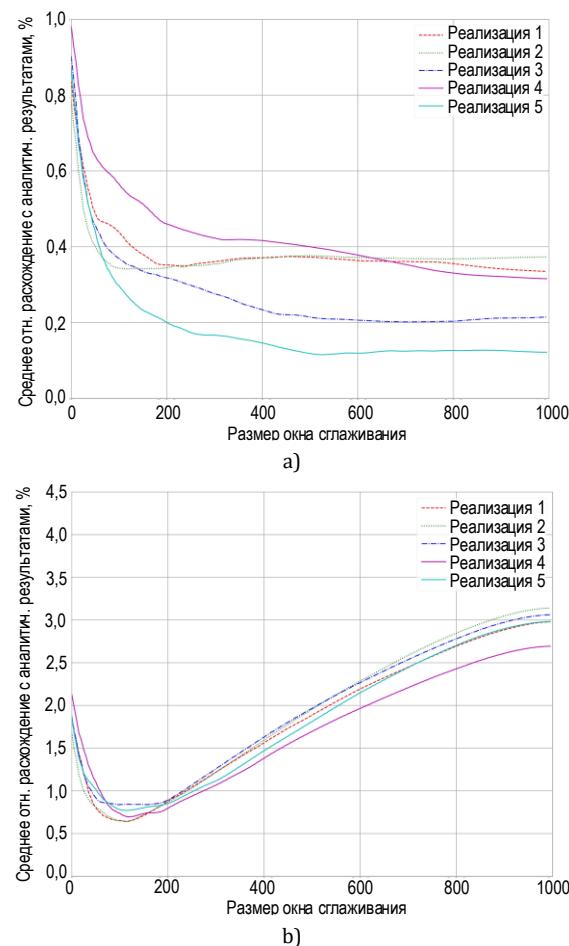
Чтобы продемонстрировать обоснованность выбора окна сглаживания, определим, как от него зависит отклонение сглаженных результатов от аналитических. Очевидно, что при слишком малом размере окна сглаженная зависимость, ввиду большой частотности исходного временного ряда,

будет в значительной мере повторять его поведение и даст незначительный эффект от усреднения. При слишком большом размере окна, напротив, могут быть сглажены существенные изменения вероятности. Для определения наиболее подходящего диапазона значений, в пределах которого следует выбирать величину окна сглаживания, предлагается использовать значение среднего относительного отклонения сглаженных значений от аналитических.

На рисунке 4 показаны графики изменения среднего относительного отклонения сглаженных результатов от аналитических в зависимости от выбранного размера окна, полученные для 5 реализаций для каждого из вариантов графа модели. Из рисунка 4а видно, что для модели без послеремонтного состояния имеется тенденция к уменьшению относительного отклонения по мере увеличения размера окна, при больших значениях ( $> 400$ ) отклонение в целом стабилизируется. Наряду с этим достигаемые в различных реализациях минимумы заметно отличаются друг от друга. Следует отметить, что получаемые графики имеют представленный вид в силу того, что вероятности состояний марковского процесса, как можно видеть из рисунка 2а, быстро достигают финитных значений и далее не изменяются. Поэтому усреднение с помощью окна все большего размера в случае статистической модели, которая также стремится к этим финитным значениям, в сущности (если отбросить быстрый переходный участок в начале графика) представляет собой вычисление статистического среднего по возрасташющей выборке. Поэтому находимая статистически вероятность исправного состояния с увеличением окна сначала все больше сходится к аналитическому значению, а затем стабилизируется и перестает существенно изменяться.

Поведение графиков (см. рисунок 4б) для варианта модели, включающего в себя послеремонтное состояние, заметно отличается. Так как в данном случае переходный участок составляет значительную часть всего процесса, сглаживание с окном слишком большого размера во всех пяти реализациях приводит к росту относительного отклонения статистического результата от аналитического. По этой причине в данном случае можно выделить диапазон размеров окна, в котором получается наилучший результат сглаживания. Как видно из рисунка 4б, в различных реализациях минимум достигается при величине окна порядка 100–200 значений.

Принимая во внимание, что в случае графиков, представленных на рисунке 4а, в названном диапазоне относительное отклонение в 4 из 5 рассмотренных реализаций близко к стабилизации, в этом случае также можно считать этот диапазон дающим сглаженные результаты приемлемой точности.



**Рис. 4. Зависимость относительного расхождения по модулю сглаженных результатов моделирования с аналитическими от размера окна сглаживания**

*Fig. 4. Relative Difference (in Absolute Values) between Smoothed and Analytical Modeling Results Depending on the Size of Smoothing Window*

Таким образом, на основании рассмотренных вариантов модели, которые характеризуются различной резкостью изменения графиков статистической вероятности, можно с достаточной общностью заключить, что предлагаемый метод моделирования совместно со сглаживанием на основе скользящего среднего с размером окна порядка 100–200 значений позволяет получить оценку вероятности исправного состояния устройства со средним относительным отклонением порядка 0,5–0,8 %.

#### Алгоритм работы и исходные данные полумарковской модели

Так как полумарковская модель опирается на ранее разработанную марковскую, алгоритм работы из [7] расширен с учетом вносимых в него изменений и представлен на рисунке 5.

В качестве входных параметров модели задаются:

- одномерный массив *states*, определяющий набор возможных состояний;

- квадратная матрица переходов  $trans\_matrix$  между состояниями;
- начальное состояние системы  $init\_state$ ;
- модельное время наблюдения  $t$ ;
- логическая переменная  $semi$ , указывающая на полумарковский характер процесса;
- функция  $semi\_func$ , выполняющая переопределение вероятностей в матрице переходов.

Выходным параметром модели, в свою очередь, является последовательность состояний  $state\_seq$ , полученная в результате имитации. Многократное выполнение алгоритма позволяет получить статистику и по ней определить вероятностные характеристики надежности устройства TSN.

В основе полумарковской модели лежит вариант графа переходов (см. рисунок 1а). Предлагается рассмотреть сценарий поведения устройства, реализуемый функцией  $semi\_func$ , который включает в себя следующие факторы, влияющие на надежность устройства:

1) постепенный износ устройства, происходящий в ходе работы (т. е. в состояниях 1, 2 и 4) и ведущий к небольшому равномерному повышению вероятности аппаратных отказов;

2) необратимая деградация устройства вследствие происходящих аппаратных отказов (т. е. при переходах из состояний 4 и 5 в состояние 1), ведущая к повышению вероятности возникновения новых;

3) периодическое обновление ПО, которое может внести новые ошибки и повышает вероятность программных отказов; после обновления в модели вводится контрольный период, в течение которого фиксируются программные отказы; каждое возникновение и восстановление отказа ПО в рамках этого периода рассматривается как выпуск исправляющего обновления, при этом вероятность новых программных отказов несколько снижается; вероятность программных отказов возвращается к значениям до обновления либо по истечении контрольного периода, либо после 4 исправлений; если же в рамках этого периода не возникло программных отказов, предполагается, что обновление не создало ошибок и, напротив, повысило стабильность работы системы, снизив вероятность программных ошибок в будущем;

4) периодическая плановая диагностика и ремонт устройства, несколько снижающие вероятность будущих аппаратных отказов.

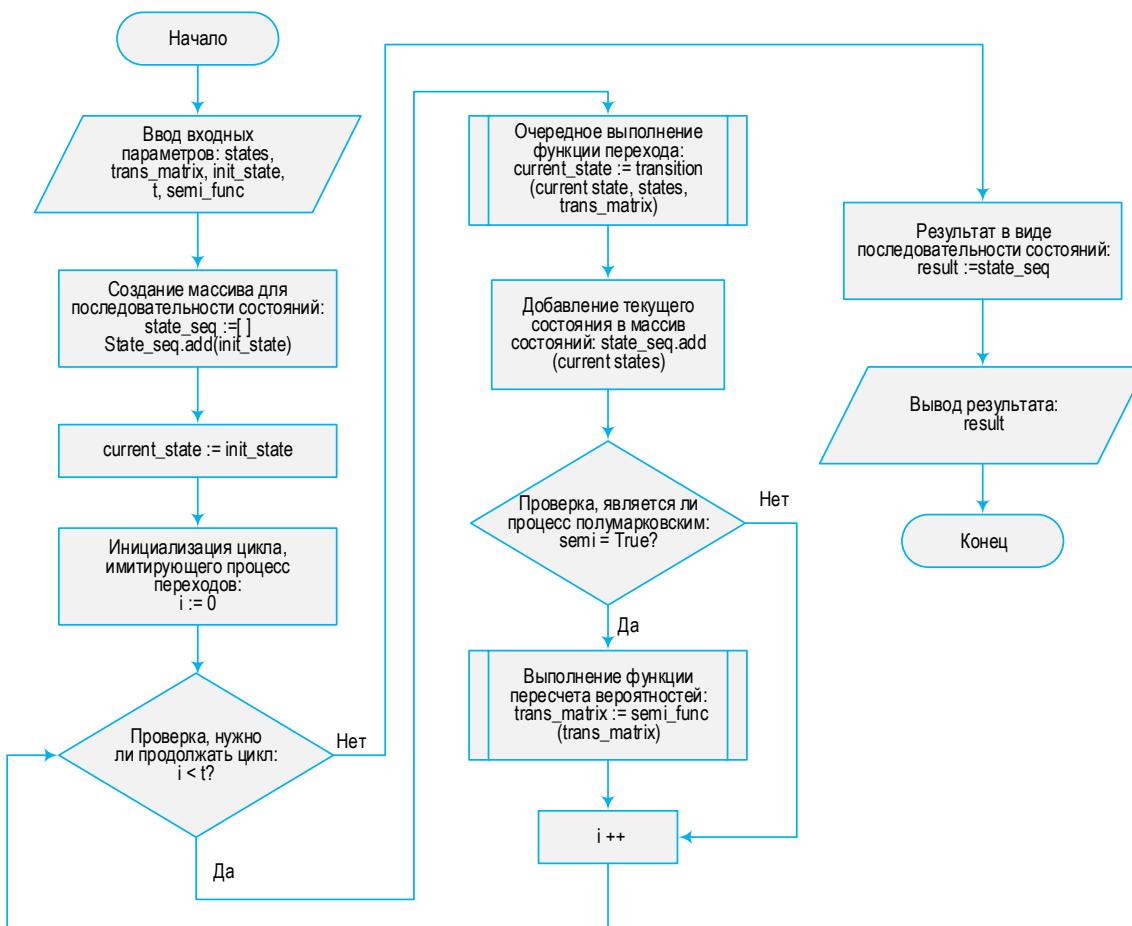


Рис. 5. Алгоритм работы полумарковской модели

Fig. 5. Semi-Markov Model Operation Algorithm

Описанные изменения вероятностей переходов между состояниями устройства TSN реализуются в модели за счет пересчета при заданных условиях первой строки матрицы переходов. Изменение вероятностей в этой строке происходит путем сложения ее с векторами, элементами которых являются приращения вероятностей. Для каждого из вышеописанных факторов в модели задается свой вектор приращений.

Предлагаемый сценарий включает в себя разноплановые факторы, как повышающие, так и понижающие вероятности отказов устройства, и позволяет, таким образом, построить динамическую модель для определения показателей надежности. При моделировании предлагается использовать исходные данные, приведенные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для моделирования

TABLE 1. Initial Data for Modeling

Параметр	Значение
Модельное время одной реализации $t$ , дн.	1000
Шаг моделирования, дн.	1
Размер выборки $N$	1000
Периодичность выпуска обновлений ПО $T_{\text{ПО}}$ , дн.	90
Периодичность плановых диагностики и ремонта $T_{\text{ДР}}$ , дн.	30
Вектор начальных вероятностей устройства $B$	(1 0 0 0 0)
Исходная матрица переходов $M$	$\begin{pmatrix} 0,99 & 0,004 & 0,002 & 0,003 & 0,001 \\ 0,05 & 0,85 & 0,10 & 0,00 & 0,00 \\ 0,10 & 0,00 & 0,90 & 0,00 & 0,00 \\ 0,05 & 0,00 & 0,00 & 0,85 & 0,10 \\ 0,10 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,90 \end{pmatrix}$
Векторы приращений вероятностей, учитывающие:	
постепенный износ устройства $\Delta_1$	$(-8 \cdot 10^{-5} \ 0 \ 0 \ 5 \cdot 10^{-5} \ 3 \cdot 10^{-5})$
снижение надежности из-за произошедшего некритического аппаратного отказа $\Delta_2$	$(-1 \cdot 10^{-4} \ 0 \ 0 \ 6 \cdot 10^{-5} \ 4 \cdot 10^{-5})$
снижение надежности из-за произошедшего критического аппаратного отказа $\Delta_3$	$(-1 \cdot 10^{-4} \ 0 \ 0 \ 5 \cdot 10^{-5} \ 5 \cdot 10^{-5})$
снижение надежности после обновления ПО $\Delta_4$	$(-3 \cdot 10^{-4} \ 2 \cdot 10^{-4} \ 1 \cdot 10^{-4} \ 0 \ 0)$
рост надежности в случае, когда обновление ПО не создало ошибок $\Delta_5$	$(3 \cdot 10^{-4} \ -2 \cdot 10^{-4} \ -1 \cdot 10^{-4} \ 0 \ 0)$
рост надежности после плановых диагностики и ремонта $\Delta_6$	$(1 \cdot 10^{-3} \ 0 \ 0 \ 6 \cdot 10^{-4} \ 4 \cdot 10^{-4})$

Кроме того, убывание вероятности исправного состояния вследствие износа и прошлых отказов ограничивается значением  $p_{11} = 0,95$ . Вероятность исправного состояния устройства TSN в данной работе рассматривается в качестве показателя надежности, как и в ранее разработанной модели [7]. Следует отметить, однако, что небольшое изменение алгоритма подсчета статистики позволяет также получить с помощью этой модели другие показатели надежности, например, вероятность нахождения в состояниях 1, 2 или 4).

## Результаты моделирования

Для иллюстрации работы рассматриваемой имитационной модели и получения представления об общем характере имитируемого процесса можно рассмотреть несколько реализаций. Их графики представлены на рисунке 6. Из них видно, что в рамках предложенного сценария вероятность исправного состояния устройства снижается вследствие различных факторов, которые частично компенсируются периодически проводимыми плановыми ремонтами. Нижняя граница убывания вероятности, заложенная в сценарий, достигается приблизительно за 750–800 дней функционирования. Таким образом, графики соответствуют заложенным в алгоритм закономерностям, что говорит о корректной работе модели.

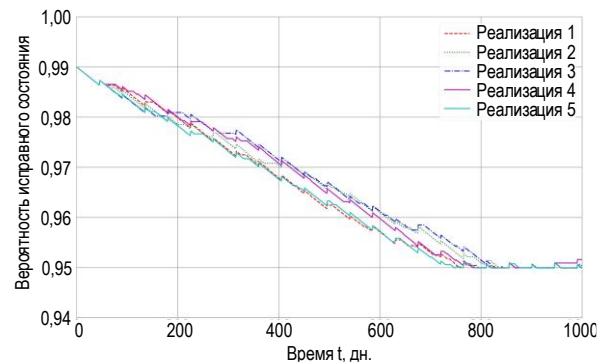
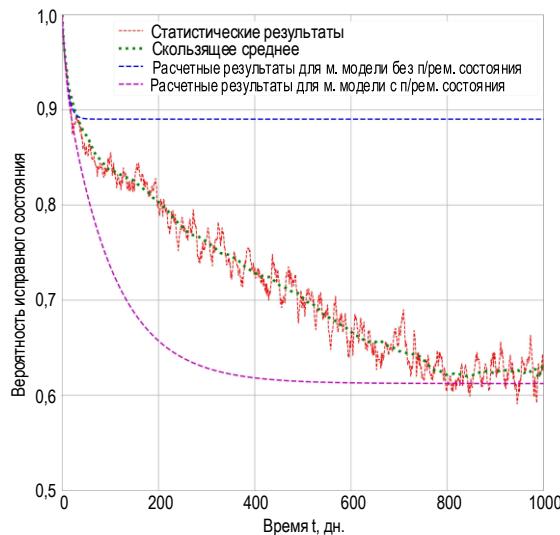


Рис. 6. Примеры реализаций полумарковской модели  
Fig. 6. Semi-Markov Model Realization Examples

На рисунке 7 представлен результат моделирования в виде статистической вероятности исправного состояния устройства, полученной на основе генерированной выборки реализаций. Для сравнения на нем также приведены аналитические кривые для двух ранее описанных вариантов марковской модели. График, соответствующий полумарковской модели, лежит между двумя аналитическими кривыми, убывая и достигая нижней границы вероятности более плавно, чем они достигают своих стационарных значений. При этом следует учесть, что названная граница  $p_{11} = 0,95$ , заложенная в полумарковскую модель, равна вероятности  $p_{66}$  сохранения послеремонтного состоя-

ния, которое является основным во втором варианте марковской модели (нижняя кривая на графике). Вместе с тем, видно, что полученное статистически значение вероятности исправного состояния приближается к аналитической кривой, соответствующей этой марковской модели. На основании этого можно заключить, что предлагаемая полумарковская модель, с одной стороны, сходится к ранее предложенной марковской и, с другой стороны, позволяет более тонко задать траекторию переходного процесса снижения вероятности, учитывая в ней различные влияющие факторы.



**Рис. 7. Статистическая вероятность, полученная в результате моделирования**

*Fig. 7. Statistical Probability Got as the Modeling Result*

Важно отметить, что предлагаемый сценарий является лишь одним из множества наборов условий, которые можно учесть в рамках модели. В них могут быть добавлены новые факторы, изменены или исключены вклады уже имеющихся факторов, что в совокупности делает предлагаемый подход к оценке показателей надежности весьма гибким. Кроме того, следует упомянуть, что в силу отсутствия широкого опыта эксплуатации оборудования TSN предложенные для моделирования исходные данные не являются результатом обобщения реальной статистики и выбраны ориентиро-

#### Список источников

1. Сапожников В.В., Сапожников В.В., Ефанов Д.В., Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. 318 с. EDN:YOYVNZ
2. Шмыгинский В.В., Глушко В.П., Казанский Н.А. Многоканальная связь на железнодорожном транспорте: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. 704 с. EDN:QNVNDX
3. Кудряшов В.А., Павловский Е.А. Передача дискретных сообщений на железнодорожном транспорте: учеб. пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. 319 с.
4. Алексеев А.И., Канаев А.К. Сети, чувствительные ко времени, и их использование на железнодорожном транспорте // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2023. № 1(78). С. 202–205. EDN:KBPMAZ
5. IEEE Std. 802.1CB™-2017. IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Frame Replication and Elimination for Reliability.

вочно. Так как задачей настоящего исследования является собственно разработка модели и проверка ее работоспособности, такое допущение можно считать правомерным.

#### Заключение

В работе описано построение имитационной полумарковской модели надежности сетевых устройств TSN, основанной на пересчете вероятностей переходов между состояниями модели в соответствии с заданным набором условий. Данний подход, как показывают результаты моделирования, позволяет формировать динамические сценарии изменения вероятностей, учитывающие разнообразные влияющие факторы, варьировать их и оценивать поведение устройства в различных случаях. При этом с помощью модели может быть получена статистическая оценка вероятности, которая постепенно сходится к расчетным результатам, получаемым в предположении о марковском характере процесса, но при этом формирует более плавную картину переходного периода.

Кроме того, в рамках разработки модели выбран метод сглаживания и произведена оценка точности имитационного подхода к определению показателей надежности сетевых устройств. Абсолютное отклонение сглаженных результатов моделирования от теоретических значений в рассмотренных вариантах модели составляет порядка 0,005. Относительное расхождение аналитических и сглаженных статистических результатов при использовании определенных в работе размеров окна сглаживания весьма невелико и составляет порядка 0,5–0,8 %.

Дальнейшая работа по улучшению полумарковской модели и способов ее применения может быть направлена на разработку альтернативных сценариев изменения вероятностей переходов между состояниями устройства, а также на исследование показателей надежности некоторого участка сети, состоящего из ряда устройств TSN, надежность которых, в свою очередь, будет описываться предложенной в настоящей работе моделью.

6. Токликишвили А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2019. 65 с.
7. Алексеев А.И., Канаев А.К. Имитационная модель функционирования устройств TSN для исследования их надёжности в условиях применения на сетях связи железнодорожного транспорта // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2025. №1(80). С. 196–199. EDN:QKLUMK
8. Галажинская О.Н., Моисеева С.П. Теория случайных процессов. Ч. 2. Марковские процессы: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 126 с.
9. Шихеева В.В. Теория случайных процессов. Марковские цепи: учеб. пособие. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. 70 с.
10. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.

## References

1. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.V., Efanov D.V., Shamanov V.I. Reliability of Railway Automation, Telemechanics and Communication Systems. Moscow: Training and Methodological Center of Railway Transport Publ.; 2017. 318 p. (in Russ.) EDN:YOYVNZ
2. Shmytinsky V.V., Glushko V.P., Kazansky N.A. *Multichannel Communication in Railway Transport*. Moscow: Training and Methodological Center of Railway Transport Publ.; 2008. 704 p. (in Russ.) EDN:QNVNDX
3. Kudryashov V.A., Pavlovsky E.A. *Transmission of Discrete Messages on Railway Transport*. Moscow: Training and Methodological Center of Railway Transport Publ.; 2017. 319 p. (in Russ.)
4. Alekseev A.I., Kanaev A.K. Time-Sensitive Networking and Its Using on Railway Transport. *Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of the Russian Electronic Networks named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day*. 2023;1(78):202–205. (in Russ.) EDN:KBPMAZ
5. IEEE Std. 802.1CB™-2017. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Frame Replication and Elimination for Reliability*.
6. Toklikishvili A.G. *Reliability of Technical Systems and Man-Made Risk*. Vladivostok: Far Eastern Federal University Publ.; 2019. 65 p. (in Russ.)
7. Alekseev A.I., Kanaev A.K. Simulation Model of TSN Devices Operation for Studying Their Reliability Under Conditions of Usage in Railway Transport Communication Networks. *Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of the Russian Electronic Networks named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day*. 2025;1(80):196–199. (in Russ.) EDN:QKLUMK
8. Galazhinskaya O.N., Moiseeva S.P. *Theory of Random Processus. Part 2. Markov Processes*. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2016. 126 p. (in Russ.)
9. Shikheeva V.V. *Theory of Random Processes. Markov Chains*. Moscow: MISIS University Publ.; 2013. 70 p (in Russ.)
10. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. *Mathematical Methods for Constructing Forecasts*. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 1997. 112 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена после рецензирования 16.11.2025; принята к публикации 05.12.2025.

The article was submitted 01.11.2025; approved after reviewing 16.11.2025; accepted for publication 05.12.2025.

## Информация об авторах:

<b>КАНАЕВ Андрей Константинович</b>	доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  <a href="https://orcid.org/0000-0002-1578-2629">https://orcid.org/0000-0002-1578-2629</a>
<b>АЛЕКСЕЕВ Артём Игоревич</b>	аспирант кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  <a href="https://orcid.org/0000-0002-6595-2024">https://orcid.org/0000-0002-6595-2024</a>

Канаев А.К. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Kanaev A.K. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.