

# Имитационная модель функционирования устройств TSN для исследования их надёжности в условиях применения на сетях связи железнодорожного транспорта

А. И. Алексеев

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
alekseevartem.ig@gmail.com

А. К. Канаев

Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
kanaev@pgups.ru

**Аннотация.** Работа посвящена имитационному моделированию надёжности устройств в сетях, чувствительных ко времени (TSN – Time-Sensitive Networking). TSN – перспективная технология Ethernet, включающая в себя ряд механизмов управления трафиком, синхронизации и резервирования. Так как в железнодорожной отрасли предъявляются особо высокие требования к бесперебойности связи, оценка надёжности сетевых устройств TSN является частной задачей в рамках комплексного исследования практической применимости этой технологии в сетях связи железнодорожного транспорта. Для решения этой задачи предлагается представленная в статье имитационная модель, которая опирается на графы переходов, построенные на основе теории марковских цепей.

**Ключевые слова:** сети, чувствительные ко времени; сети TSN; сети Ethernet; надёжность сетей связи; имитационное моделирование; марковские цепи

## I. ВВЕДЕНИЕ

Надёжная бесперебойная работа является ключевым требованием к системам связи, применяемым на железнодорожном транспорте [1]. Классическая технология Ethernet не предоставляет особых гарантий доставки кадров, однако в настоящее время разрабатывается технология сетей, чувствительных ко времени (TSN), расширяющая возможности стандартного Ethernet за счёт механизмов контроля и управления трафиком. Обеспечение надёжности передачи также является одним из направлений её развития. В рамках всей группы стандартов TSN института IEEE стандарты, касающиеся вопросов надёжности, относительно немногочисленны и представлены самостоятельным стандартом 802.1CB, а также поправками 802.1Qca и 802.1Qci к основному стандарту 802.1Q [2].

Стандарт 802.1CB описывает метод повышения надёжности доставки сообщений в сети TSN, основанный на дублировании кадров и пересылке их по независимым маршрутам. Поправки 802.1Qca и 802.1Qci относятся к основному стандарту группы, описывающему различные аспекты реализации сетей TSN, и касаются вопросов резервирования маршрутов и фильтрации отдельных потоков TSN [3][4].

Таким образом, действующие в области надёжности стандарты TSN ориентированы на повышение

структурной надёжности сети в целом, надёжность же отдельных устройств в них не рассматривается.

В настоящей работе предлагается имитационная модель надёжности устройства TSN, опирающаяся на общие подходы теории надёжности в сочетании с аппаратом теории марковских процессов.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МНОЖЕСТВА СОСТОЯНИЙ И СТРУКТУРЫ ПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ НИМИ

Для характеристики технического объекта теория надёжности оперирует понятиями исправного, неисправного, работоспособного и неработоспособного состояний. Они используются как в профессиональной учебной литературе, в том числе связанной со сферой железнодорожного транспорта, так и в нормативных документах по стандартизации, в частности, в ГОСТ Р 27.102-2021 «Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения» [5][6].

**Исправным** называется состояние объекта, в котором все его параметры соответствуют установленным документацией требованиям. Если хотя бы один из параметров им не соответствует, состояние объекта считается **неисправным**. В **работоспособном** состоянии объект находится в том случае, если требованиям документации соответствуют все те его параметры, которые характеризуют способность выполнять заданные функции. Соответственно, если хотя бы один из этого набора параметров не соответствует требованиям, состояние объекта является **неработоспособным**.

Марковский процесс также представляет собой случайный процесс перехода системы между её возможными состояниями, в котором будущее состояние зависит только от текущего состояния системы, но не зависит от пути его достижения. В случае, когда набор состояний дискретен, марковский процесс называется марковской цепью [7]. Именно дискретное представление будет удобно для описания жизненного цикла устройства TSN с точки зрения надёжности.

Множество рассматриваемых состояний системы необязательно ограничивать приведённым выше набором. Его можно расширить и детализовать, выстроив градацию неисправных работоспособных и неработоспособных состояний на основании выбранных

критериев. В рамках данной работы предлагается ввести следующий набор состояний сетевого устройства TSN:

- 1) **Исправное состояние** – рабочее состояние устройства.
- 2) **Состояние отказа ПО** – программная неисправность, приводящая к ошибкам в процессе обработки кадров или его замедлению.
- 3) **Состояние критического отказа ПО** – серьёзная программная неисправность, выводящая устройство из строя.
- 4) **Состояние аппаратного отказа** – аппаратная неисправность, приводящая к ошибкам в процессе обработки кадров или его замедлению.
- 5) **Состояние критического аппаратного отказа** – серьёзная аппаратная неисправность, выводящая устройство из строя.

Ещё одно состояние, послеремонтное, будет учитываться только в одном из двух вариантов модели:

- 6) **Послеремонтное состояние** – исправное состояние после восстановления устройства.

Таким образом, в системе в базовом варианте модели выделяется исправное состояние и четыре различных варианта неисправных состояний. С одной стороны, отказы разделены по степени влияния на выполнение сетевым устройством ключевой задачи – обработки принимаемых и передаваемых кадров Ethernet. В этом смысле некритический и критический отказы соответствуют неисправному работоспособному и неисправному неработоспособному состояниям, определяемым стандартом. С другой стороны, отказы разделены по вызывающей их причине. Выделение двух групп неисправностей основано на общепринятом представлении о компьютерных системах (к которым относится и современное сложное коммуникационное оборудование) как о сочетании двух составляющих: аппаратного и программного обеспечения [8].

Во втором варианте модели также вводится второе являющееся исправным (в смысле теории надёжности) состояние – послеремонтное. Оно соответствует восстановленной системе, для которой, однако, в силу прошлого отказа предполагается несколько сниженная

по сравнению с изначальной надёжностью. В этом случае во избежание путаницы состояние 1 будет точнее назвать «исходным», а не «исправным».

Помимо множества состояний, для описания марковской цепи необходимо также ввести множество переходов между этими состояниями и задать вероятности переходов. Для наглядности марковскую цепь удобно представить в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют состояниям системы, дуги – переходам между ними, а веса дуг – вероятностям этих переходов. Для разрабатываемой модели граф переходов марковской цепи изображён на рис. 1 в двух вариантах: не учитывающем и учитывающем послеремонтное состояние как отдельное.

Как видно из представленных графов, устройство может перейти из исправного состояния в любое из состояний отказа. Некритические отказы (состояния 2 и 4) могут перейти в соответствующие критические отказы (состояния 3 и 5). Одновременное возникновение программных и аппаратных отказов предполагается маловероятным. В случае второй модели после первого отказа устройство уже не может вернуться к состоянию 1 и в результате восстановлений после отказов переходит к послеремонтному состоянию 6.

### III. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

В настоящей работе используется имитационный подход к построению марковской модели, реализуемой в виде программы на языке Python. В основе функционирования модели лежит организация цикла, в каждой итерации которого на основе текущего состояния и заданной матрицы вероятностей переходов случайно выбирается следующее состояние устройства. За счёт многократного выполнения модели возможно получить статистику и сделать выводы о характеристиках надёжности устройства при заданных входных данных.

**Входными параметрами** модели являются:

- `states` – одномерный массив, содержащий в себе перечень  $k$  возможных состояний системы;
- `init_state` – элемент массива `states`, задающий исходное состояние системы;

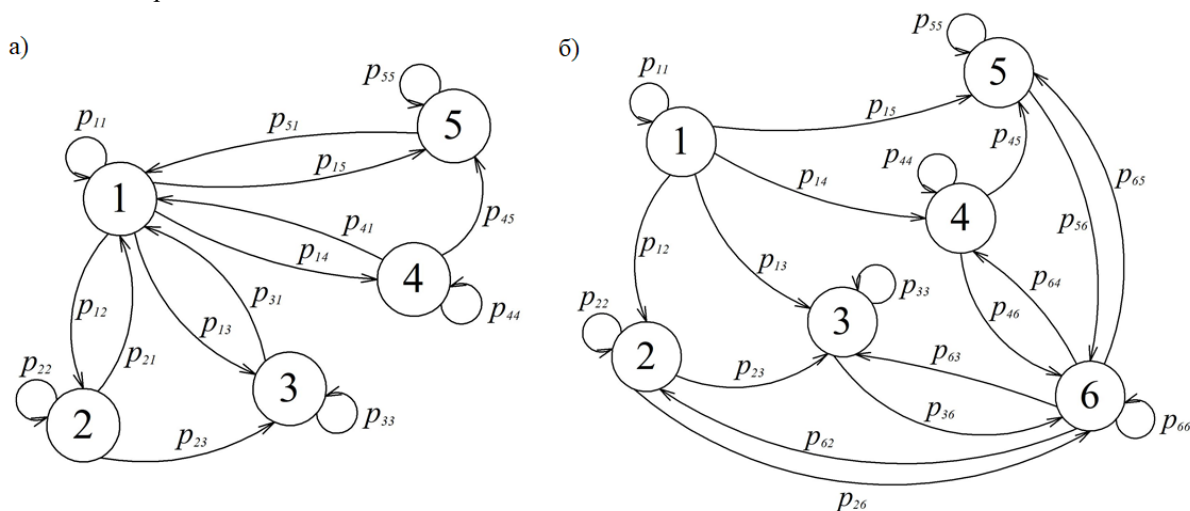


Рис. 1. Графы переходов марковской цепи (а – без учёта послеремонтного состояния; б – с учётом послеремонтного состояния)



Рис. 2. Алгоритм работы программы

- $trans\_matrix$  – матрица переходов размером  $k \times k$ , элементы которой с индексами  $i, j$  соответствуют вероятностям перехода  $p_{i,j}$  из состояния с индексом  $i$  в состояние с индексом  $j$  массива  $states$ . Элементы главной диагонали матрицы соответствуют вероятностям остаться в текущем  $i$ -ом состоянии;
- $t$  – целочисленная величина, характеризующая количество итераций модели (т.е. определяющая общее время наблюдения за системой).

**Выходным параметром** модели является:

- $result$  – переменная, выводящая результат вычислительного эксперимента в виде одномерного массива размерностью  $t$  с последовательностью всех состояний, в которых была система.

Разработанный алгоритм работы программы подробно представлен на рис. 2. Он включает в себя этап ввода входных параметров, подготовительные операции для работы цикла, сам имитационный цикл и вывод результатов реализации модели.

Реальный процесс непрерывен во времени, но в рамках модели будет удобно рассматривать его как процесс с дискретным временем, где смены состояний происходят через некоторые равные интервалы. Такое представление естественно для модели, реализованной в виде циклически выполняемой программы. При этом, если интервалы между моментами смены состояний выбраны достаточно малыми относительно общего времени реализации модели, имитируемый процесс можно считать практически непрерывным.

#### IV. ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

##### A. Цель эксперимента

Для дальнейшего использования имитационной модели необходимо удостовериться в правильности получаемых с помощью неё результатов. Поэтому вычислительные эксперименты в данной работе посвящены верификации разработанной модели с помощью методов теории марковских процессов.

Известно, что вероятности состояний марковской цепи после любого  $n$ -ого перехода можно получить,

умножив вектор начальных вероятностей состояний на матрицу переходов  $n$  раз [9]:

$$P(n) = B \times M^n. \quad (1)$$

Это соотношение позволит рекуррентно вычислять теоретические значения вероятностей для каждого шага модели, умножая на матрицу  $M$  вектор, получаемый на предыдущем шаге, а затем сопоставить результат с статистическими данными, получаемыми в ходе моделирования.

##### B. Исходные данные

Моделирование проводится в следующих условиях:

- шаг модели – 1 день, общая длительность наблюдения  $t = 1000$  дней;
- выборка для каждой из моделей формируется из  $N = 1000$  реализаций (длительностью  $t$  каждая);
- начальное состояние для каждого из вариантов модели – состояние 1, поэтому векторы начальных вероятностей будут соответственно равны:

$$B_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$B_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0).$$

- вероятности переходов выбраны ориентировочно и задаются для вариантов модели соответствующими матрицами:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 0,99 & 0,004 & 0,002 & 0,003 & 0,001 \\ 0,05 & 0,85 & 0,10 & 0,00 & 0,00 \\ 0,10 & 0,00 & 0,90 & 0,00 & 0,00 \\ 0,05 & 0,00 & 0,00 & 0,85 & 0,10 \\ 0,10 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,90 \end{pmatrix},$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 0,99 & 0,004 & 0,002 & 0,003 & 0,001 & 0,00 \\ 0,00 & 0,85 & 0,10 & 0,00 & 0,00 & 0,05 \\ 0,00 & 0,00 & 0,90 & 0,00 & 0,00 & 0,10 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,85 & 0,10 & 0,05 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,90 & 0,10 \\ 0,00 & 0,025 & 0,006 & 0,015 & 0,004 & 0,95 \end{pmatrix}.$$

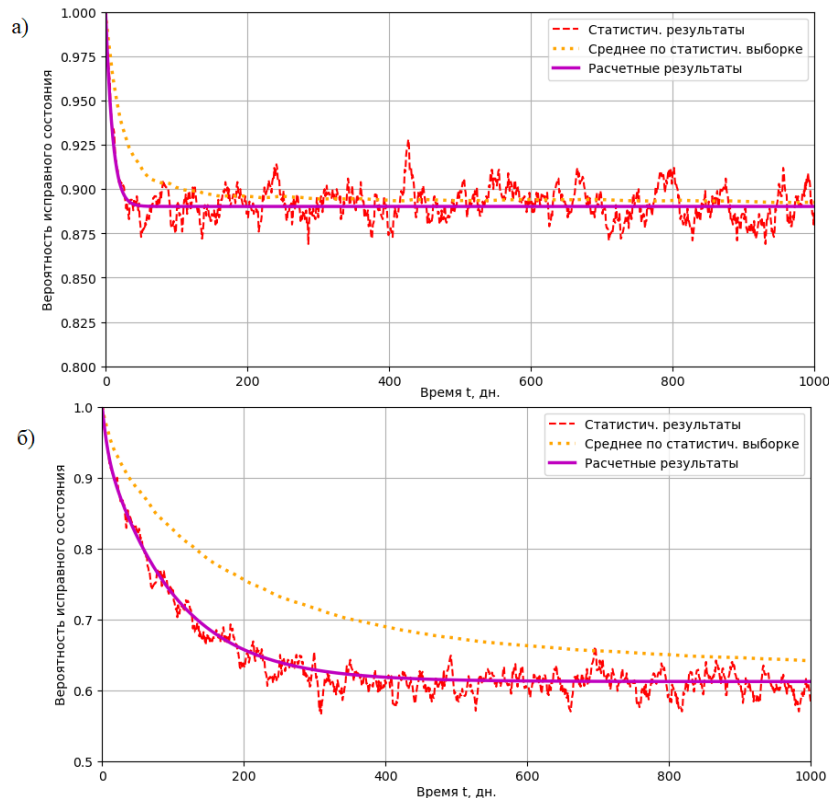


Рис. 3. Графики статистической и расчетной вероятностей (а – без учёта послеремонтного состояния, б – с учётом послеремонтного состояния)

### С. Результаты эксперимента

В качестве результата эксперимента используются значения вероятности исправного состояния (для первого варианта модели таковым является состояние 1, для второго – состояния 1 и 6). В ходе работы модели статистические вероятности найдены как относительные частоты появления исправного состояния в выборке на каждом шаге модели, и, таким образом, сформирован временной ряд. Также на каждом шаге вычислено текущее среднее значение вероятности (для  $n$ -го шага оно определено как среднее арифметическое первых  $n$  элементов ряда). Аналитические значения вероятности для шагов модели получены по выражению (1).

Результаты эксперимента для двух вариантов модели показаны на графиках рис. 3. Как видно, изменение статистической вероятности, полученной в ходе моделирования, соответствует изменению расчётного значения, полученного аналитически, на всём интервале наблюдения. Статистические результаты колеблются в окрестности теоретического графика, в целом оставаясь близкими к нему. На основании этого можно сказать, что разработанная модель корректно отображает поведение рассматриваемых марковских цепей.

Следует, однако, отметить, что простое среднее по времени значение статистической вероятности медленно сходится к теоретическому (что особенно видно на втором графике) и не соответствует ему на начале интервала. Поэтому в дальнейшем при работе с моделью необходимо выбрать иные методы для анализа данных.

### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена имитационная модель надёжности устройств TSN на основе аппарата марковских цепей. Введены множества состояний устройств и графы переходов, описан алгоритм работы

модели и проведены эксперименты, позволяющие сравнить результат моделирования с теоретическим. Итоги экспериментов показывают, что поведение модели соответствует результатам аналитического расчёта.

Дальнейшая работа будет посвящена расширению данной модели и выбору эффективных средств анализа получаемых статистических данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шмыгинский В.В., Глушко В.П., Казанский Н.А. Многоканальная связь на железнодорожном транспорте. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. / Под ред. Шмыгинского В.В. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 704 с.
- [2] Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group [Электронный ресурс]. – URL: <https://1.ieee802.org/tsn/> (дата обращения: 03.03.2025)
- [3] IEEE Std. 802.1™-2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Networks – Bridges and Bridged Networks
- [4] Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. TSN – сети Ethernet, чувствительные ко времени – «Инфокоммуникационные технологии» Том 19, № 2, 2021. с. 187–201.
- [5] Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / Вл.В. Сапожников и др.; под ред. Вл.В. Сапожникова. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. 318 с.
- [6] ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения
- [7] Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 10-е изд., М.: Высш. шк., 2006. 575 с.: ил.
- [8] Информатика. Базовый курс. 2-е издание / Под ред. С.В. Симоновича. СПб.: Питер, 2005. 640 с.: ил.
- [9] Галажинская О.Н., Моисеева С.П. Теория случайных процессов. Ч. 2: Марковские процессы: учеб. пособие. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 126 с.