

Применение цифрового двойника предприятия для оценки производственных показателей транспортной организации

В.В. Кашковский¹✉, Ю.М. Краковский¹, В.А. Начигин¹, П.С. Назаров²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Резюме

Массовая эксплуатация любых видов транспортных средств требует существенных капитальных вложений и финансовых затрат на обслуживание и ремонт эксплуатируемой техники. Для получения оптимальных производственных показателей транспортной организации необходимо осуществлять управление производственными фондами и задействованными в работе с ними специалистами. В настоящее время решение подобных задач происходит интуитивно, на основании предшествующего опыта руководителей, поэтому весьма актуален вопрос реализации научного подхода к управлению транспортными предприятиями. В данной статье представлены результаты поиска варианта оптимальной загрузки группы обслуживания и ремонта транспортной организации. В качестве инструмента для разрешения этой и других управленческих проблем транспортной организации предлагается цифровой двойник предприятия. Анализ предметной области показал, что на данный момент получение подобных результатов какими-либо другими методами исследования, кроме этого, не представляется возможным. Исходными данными для построения цифрового двойника являются результаты испытаний изделий на надежность и хронометраж выполнения работ. Применение указанного метода позволило провести ряд исследований производственных показателей гипотетической транспортной организации, в частности был осуществлен поиск варианта оптимальной загрузки группы обслуживания и ремонта. Однако на этом возможности цифрового двойника предприятия далеко не исчерпаны. Модель при вводе соответствующих исходных данных позволяет решать целый ряд производственных задач, далеко выходящих за рамки этой работы. Представленный цифровой двойник предприятия может использоваться не только на производстве, но и при изучении некоторых технических дисциплин бакалавриата, специалитета и магистратуры, например, таких как «Надежность в технике», «Техническая диагностика», «Организация перевозок и управление на транспорте» (железнодорожный транспорт). Кроме того, имеется возможность применять его в качестве тренажера для обучения и переподготовки руководящих кадров.

Ключевые слова

управление на транспорте, цифровой двойник предприятия, транспортная организация, обслуживание и ремонт объектов транспорта, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов

Для цитирования

Применение цифрового двойника предприятия для оценки производственных показателей транспортной организации / В.В. Кашковский, Ю.М. Краковский, В.А. Начигин, П.С. Назаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4 (84). С. 80–90. DOI 10.26731/1813-9108.2024.4(84).80-90.

Информация о статье

поступила в редакцию: 03.09.2024 г.; поступила после рецензирования: 06.12.2024 г.; принята к публикации: 09.12.2024 г.

Using a digital twin of an enterprise to assess the production performance of a transport organization

V.V. Kashkovskii¹✉, Yu.M. Krakovskii¹, V.A. Nachigin¹, P.S. Nazarov²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, the Russian Federation

✉victor.kashkovskij@mail.ru

Abstract

Mass operation of any type of transport requires significant capital investments and financial costs for the maintenance and repair of the equipment in use. To obtain optimal production indicators of a transport organization, it is necessary to manage production assets and specialists involved in operation. Currently, such problems are solved intuitively, based on the previous experience of managers. Therefore, the task of implementing a scientific approach to the management of transport organizations is quite relevant. This paper presents the results of searching for an optimal variant of the service and repair group workload of a transport organization. A digital twin of an enterprise is proposed as a tool for solving this and other management problems of a transport organization. The analysis of the subject area showed that at the moment it is not possible to obtain such results by any other

research methods, except for a digital twin of an enterprise. The initial data for constructing a digital twin of an enterprise are the results of product reliability tests and work timing. The use of a digital twin of an enterprise made it possible to perform a number of studies of the production indicators of a hypothetical transport organization and, in particular, to search for an optimal variant of the service and repair group workload of a transport organization. However, the capabilities of a digital twin of an enterprise are far from exhausted. The model, when entering the appropriate initial data, allows to solve a number of production problems that go far beyond the scope of this work. The digital twin of the enterprise presented in the work can be used not only in production, but also in studying a number of technical disciplines of the bachelor's, specialist and master's degrees such as «Reliability in Engineering», «Technical Diagnostics», «Organization of Transportation and Management in Transport» (Railway Transport). In addition, the digital twin of the enterprise can be used as a simulator for training and retraining the management personnel.

Keywords

transport management, digital twin of an enterprise, transport organization, maintenance and repair of transport facilities, mean time between failures, failure rate

For citation

Kashkovskii V.V., Krakovskii Yu.M., Nachigin V.A., Nazarov P.S. Primenenie tsifrovogo dvoynika predpriyatiya dlya otsenki proizvodstvennykh pokazatelei transportnoi organizatsii [Using a digital twin of an enterprise to assess the production performance of a transport organization]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, No. 4(84), pp. 80–90. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.4(84).80-90.

Article info

Received: September 3, 2024; Revised: December 6, 2024; Accepted: December 9, 2024.

Введение

Массовая эксплуатация любых видов транспортных средств требует существенных капитальных вложений и финансовых затрат на обслуживание и ремонт эксплуатируемой техники. Для получения оптимальных производственных показателей транспортной организации необходимо осуществлять управление производственными фондами и задействованными в работе с ними специалистами. В настоящее время решение подобных задач осуществляется интуитивно, на основании предшествующего опыта руководителей, поэтому весьма актуальна задача реализации научного подхода к управлению транспортными организациями. Для исследования производственного процесса транспортной организации ее деятельность независимо от вида транспорта (железнодорожный, автомобильный, воздушный и т.п.) целесообразно представить в виде графов, используемых для описания переходов состояний в системах массового обслуживания (СМО). Описание деятельности транспортного предприятия в виде графов переходов состояний позволяет использовать теорию СМО для решения ряда важных производственных задач, в первую очередь осуществлять поиск оптимального варианта использования имеющихся у данной организации расходуемых ресурсов. Поскольку любые ресурсы можно выразить в денежном эквиваленте, постольку эффективный или неэффективный их расход на практике

может привести как к существенному повышению прибыли, так и к большим неоправданным финансовым потерям. Исходя из актуальности решения задач по поиску оптимального варианта расходования ресурсов транспортной организации, целью данной работы является исследование и рациональный выбор параметров управления ей.

Характерным примером СМО является система технической эксплуатации (СТЭ). Под СТЭ далее будем понимать здания, сооружения, средства транспорта, контрольно-поверочную аппаратуру, средства ремонта и ремонтное оборудование, штатный состав групп обслуживания и ремонта, другие людские и материальные средства, необходимые для обеспечения работы парка однотипных технических объектов (изделий) [1]. В настоящей работе СТЭ будем называть транспортную организацию, занимающуюся массовой эксплуатацией однотипной техники.

Теория СМО имеет самую широкую область применения в различных жизненно значимых отраслях: экономике, социальной сфере, военном деле, в области организации производства и обслуживания, на транспорте, связи и др. [2–13].

СМО – система, которая производит обслуживание поступающих в нее требований (заявок). Потоки событий, возникающие в СМО, рассматриваются в теории массового обслуживания. В свою очередь теория массового

обслуживания – это раздел теории вероятностей, изучающий потоки требований, поступающих в СМО и выходящих из них, длительности ожидания начала обслуживания, длины очередей и прочие характеристики СМО [2–13].

Представленный в рамках данной работы цифровой двойник предприятия (транспортной организации или СТЭ) является системой с ожиданием, он имеет накопитель бесконечной емкости для буферизации поступивших заявок на обслуживание парка технических объектов. Технические объекты (далее для краткости технические объекты будем называть просто объектами или изделиями) могут находиться в исправном состоянии, состоянии отказа, состоянии плановой замены и др. Ожидающие требования на обслуживание объектов образуют очередь. Все работы на объектах осуществляет группа обслуживания, штаты которой могут быть укомплектованы специалистами разной квалификации. Исходными данными для построения цифрового двойника предприятия являются результаты испытаний изделий на надежность и хронометраж выполнения работ.

Чаще всего принято рассматривать СМО с бесконечным объемом парка эксплуатируемых объектов. В этом случае потоки событий перехода системы из одного состояния в другое являются простейшими (стационарными пуассоновскими). Это позволяет использовать для описания СМО математический аппарат марковских моделей. На практике объем парка изделий, эксплуатируемых в рамках исследуемой

СТЭ, может быть достаточно ограниченным. В этом случае потоки событий будут нестационарными, а плотность времени распределения между событиями перехода системы из одного состояния в другое отличаться от экспоненциальной. Такая СМО может быть описана и исследована с помощью математического аппарата полумарковских моделей [14–24]. Однако, не смотря на неизбежные упрощения вербальной модели СТЭ, математический аппарат ее полумарковской модели получается исключительно сложным. Другая проблема заключается в том, что столь же сложно перевести известные показатели надежности объектов в априори неизвестные показатели интенсивности нестационарных потоков событий и закон плотности распределения времени между соседними событиями в потоке. Главная проблема в том, что с помощью полумарковской модели невозможно описать такие широко распространенные эксплуатационные мероприятия как, например, организация ступенчатой выработки ресурса и др. В результате полумарковская модель получает существенное количество упрощений по отношению к моделируемой системе и не позволяет исследовать многие свойства и параметры СТЭ. При таких упрощениях исследование СТЭ теряет практический смысл.

Выходом из сложившейся ситуации является применение цифрового двойника предприятия, имитирующего работу транспортной организации.

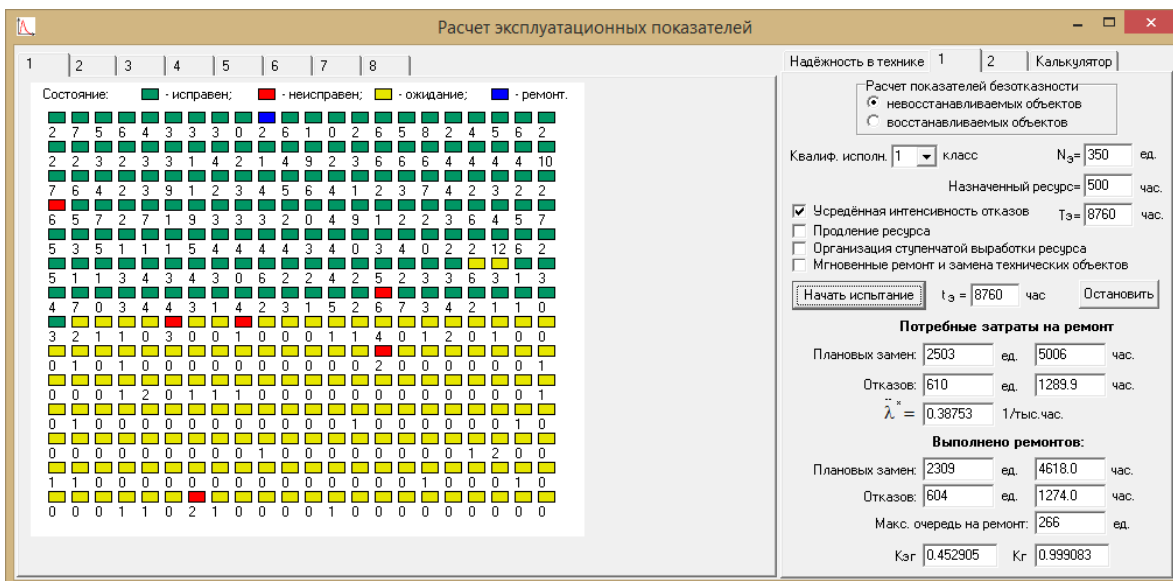


Рис. 1. Программная реализация цифрового двойника предприятия
Fig. 1. Software implementation of an enterprise digital twin

Вербальное описание цифрового двойника предприятия и постановка задачи

Реализация статистической модели СТЭ – это оригинальный программный продукт, разработанный авторами (рис. 1).

СТЭ имеет системные ограничения:

1. Объем парка технических объектов N_3 , эксплуатируемых в ходе моделирования работы СТЭ, переменная величина. Она задается в начале эксперимента в диапазоне от 10 до 1 000 объектов и не может быть изменена в его ходе.

2. В эксперименте могут участвовать либо восстанавливаемые, либо невосстанавливаемые объекты. При отказе невосстанавливаемых объектов они заменяются на новые с нулевой наработкой. Приведение восстанавливаемых объектов в работоспособное состояние осуществляется ремонтом. После ремонта восстанавливаемого объекта его начальная наработка равна наработке на момент отказа. В начале эксперимента и после замены по ресурсу все объекты имеют нулевую наработку.

Эксплуатация объектов осуществляется по ресурсу. Назначенный ресурс объектов задается до начала эксперимента. Максимальный назначенный ресурс $T_p = 1\,400$ ч. Поскольку максимальная наработка объектов до первого отказа T_1 составляет примерно 1 400 ч., постольку $T_p = 1\,400$ ч. соответствует эксплуатации объектов до отказа. Выполнение других планово-предупредительных мероприятий на объектах, кроме замены по ресурсу, не предусмотрено.

Исправные технические объекты работают непрерывно и круглосуточно на протяжении всего эксперимента. Продолжительность эксперимента T_3 может быть задана от одного года ($T_3 = 8\,760$ ч.) до пяти лет ($T_3 = 43\,800$ ч.).

Одновременные плановые замены большого числа объектов резко увеличивают очередь на обслуживание и делают работу группы обслуживания нестабильной. Для увеличения равномерности работы группы обслуживания в СТЭ возможна организация ступенчатой выработки ресурса. При организации ступенчатой выработки ресурса в начале эксперимента на эксплуатацию поступает только 10 % от полного объема парка объектов. Через 100 ч эксплуатации t_3 к ним добавляется еще 10 % и т.д. Таким образом, парк объектов достигает полного объема при достижении системой времени эксплуатации t_3 1 000 ч.

Вторым методом организации более равномерной работы группы обслуживания является продление ресурса. Если объект выработал назначенный ресурс, но группа ремонта занята, то ему назначается продление ресурса. Объект не снимается с эксплуатации и продолжает работать до того времени, пока не освободится группа обслуживания. Если в процессе ожидания объект наработал 50 ч сверх назначенного ресурса T_p , то он снимается с эксплуатации и встает в очередь на обслуживание.

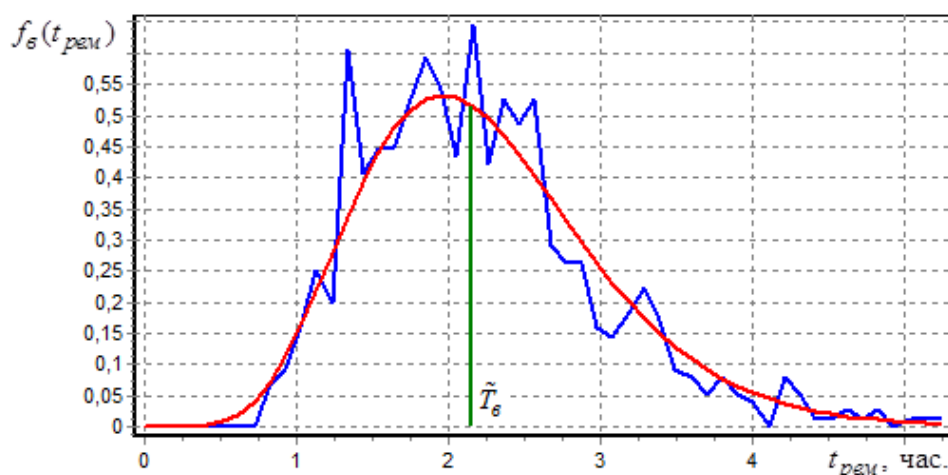


Рис. 2. Плотность распределения времени выполнения ремонта группой обслуживания, укомплектованной специалистами первого класса (красный график – теоретическая плотность распределения времени выполнения ремонта по закону Эрланга; синий график – статистическая плотность времени выполнения ремонта)

Fig. 2. Density of distribution of repair time by a maintenance group staffed by 1st class specialists (the red graph is the theoretical distribution density of the repair time according to Erlang's law; the blue graph is the statistical density of repair completion time)

Группа обслуживания

Все работы на объектах выполняет одна группа обслуживания. На протяжении эксперимента она работает непрерывно (24 ч в сут.) в три смены. Одновременно группа обслуживания может выполнять работы только на одном объекте.

Неисправные объекты и объекты, выработавшие ресурс, либо поступают на ремонт или замену в группу обслуживания, либо дождаются в очереди на ремонт и обслуживание. Время ожидания в очереди не ограничено, выход из очереди возможен только для выполнения работ в группе обслуживания.

В рассматриваемой СТЭ все объекты имеют порядковый номер. Очередь отказавших и выработавших ресурс объектов общая. Объекты из общей очереди обслуживаются в порядке номеров. Первыми обслуживаются объекты с минимальными номерами. Если группа обслуживания перегружена, то объекты с максимальными номерами останутся необслуженными до конца эксперимента.

Время ремонта объекта – это случайная величина, подчиненная закону распределения Эрланга (рис. 2). Параметры плотности распределения $f_b(t_{\text{рем}})$ зависят от квалификации специалистов группы, которая задается до начала эксперимента. На практике показатели распределения времени выполнения ремонта \tilde{T}_e (среднее время ремонта) и $\tilde{\sigma}_e$ (среднеквадратическое отклонение времени выполнения ремонта) определяются хронометражем и пересчитываются в показатели распределения Эрланга. Время ремонта измеряется в часах.

Полное время ремонта состоит из времени диагностики и времени ремонта. Время диагностики распределено по закону $f_d(t_d)$, близкому по форме к закону Эрланга (рис. 3).

Время плановой замены объекта – не случайная величина, заданная регламентом выполнения плановых работ, зависит от квалификации специалистов группы обслуживания. Для специалистов первого класса время плановой замены составляет 2 ч, для специалистов второго класса – 4 ч, для специалистов третьего класса – 6 ч.

Технический объект

Показатели надежности объекта определяются плотностью распределения наработки до отказа $f(t)$, полученной при испытании объекта на надежность. В статистической модели СТЭ показатели надежности объектов заданы генератором случайных чисел, плотность распределения вероятностей которого показана на рис. 3. Плотность распределения наработки до отказа объекта, эксплуатируемого в статистической модели СТЭ, имеет три периода: А – период приработки; Б – период нормальной эксплуатации; В – период старения (рис. 4).

При постановке нового объекта на эксплуатацию генератор случайных чисел с плотностью распределения $f(t)$ задает этому объекту время наработки до первого отказа t_1 . Если это восстанавливаемый объект, то при наработке t_1 он выбывает из эксплуатации; если восстанавливаемый объект, то при наработке t_1 он поступает в ремонт. После ремонта генератор случайных чи-

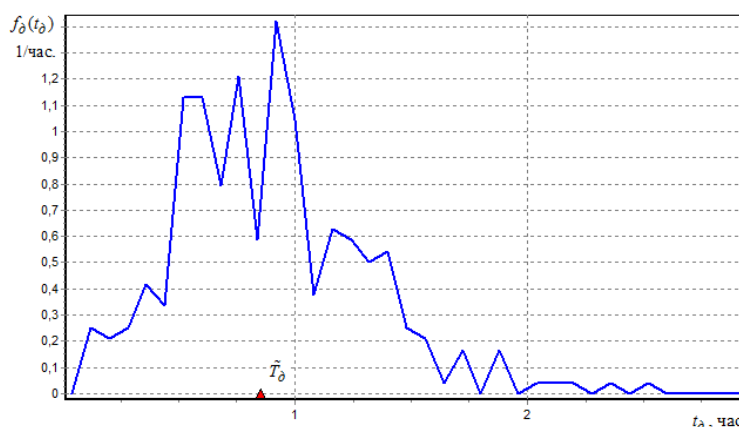


Рис. 3. Плотность распределения времени диагностирования $f_d(t_d)$ группой обслуживания, укомплектованной специалистами первого класса (среднее время диагностирования $\tilde{T}_d = 0,86$ ч)

Fig. 3. Density of distribution of diagnostic time $f_d(t_d)$ by a service group staffed with 1st class specialists (average diagnosis time $\tilde{T}_d = 0,86$ h)

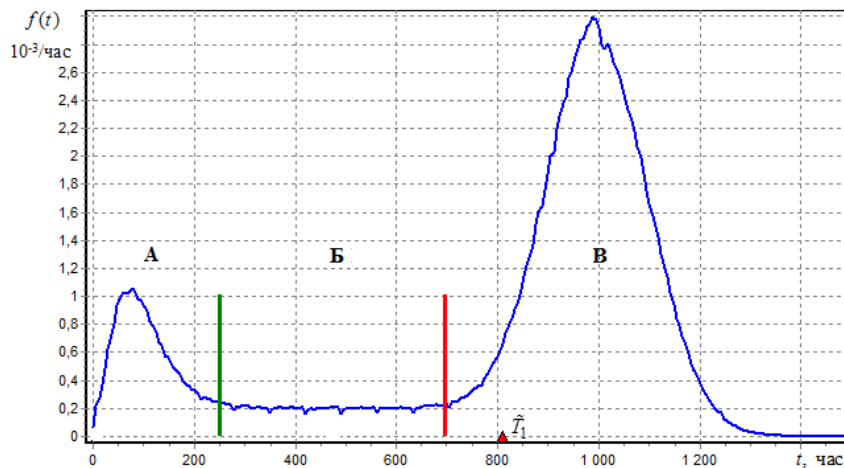


Рис. 4. Плотность распределения наработки до отказа технических объектов (среднее время наработки до первого отказа $\tilde{T}_1 = 810,6$ ч)

Fig. 4. Distribution density of time to failure of technical objects (average time to first failure $\tilde{T}_1 = 810,6$ h)

сел задает ему время наработки до второго отказа $t_2 > t_1$. При втором отказе задается время наработки до третьего отказа $t_3 > t_2$ и т.д., до выработки назначенного ресурса.

Граф состояний технического объекта показан на рис. 5.

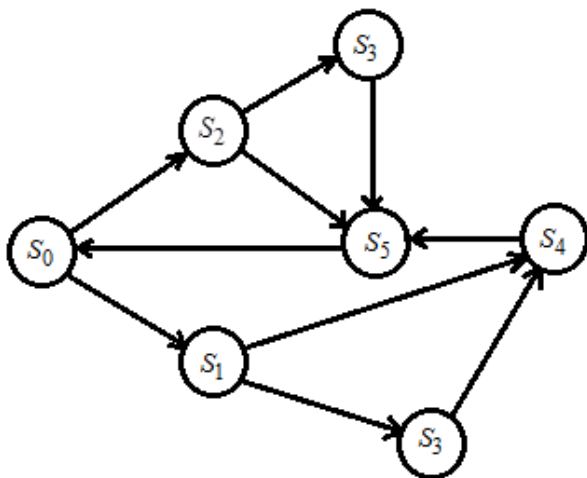


Рис. 5. Граф состояний технического объекта:

S_0 – исправный объект; S_1 – объект в состоянии отказа; S_2 – объект в состоянии выработки назначенного ресурса; S_3 – объект в очереди на обслуживание или ремонт; S_4 – состояние диагностики объекта; S_5 – состояние ремонта или плановой замены объекта

Fig. 5. State graph of a technical object:

S_0 – a serviceable object; S_1 – an object in a state of failure; S_2 – an object in a state of exhaustion of the assigned resource; S_3 – an object in a queue for maintenance or repair; S_4 – the state of diagnostics of the object; S_5 – the state of repair or planned replacement of the object

Построение типового графика интенсивности отказов. Проверка адекватности статистической модели системы технической эксплуатации

Интенсивность потока отказов $\tilde{\lambda}(\Delta t_{эi})$ для невозстанавливаемых объектов является важнейшим эксплуатационными показателями безотказности:

$$\tilde{\lambda}(\Delta t_{эi}) = \frac{\Delta n_i}{\Delta t \sum \Delta t_{эi}}, \quad (1)$$

где Δn_i – число отказов на интервале времени эксплуатации парка однотипной техники $\Delta t_{эi}$; $\Delta t \sum (\Delta t_{эi})$ – суммарное приращение наработки объектов на интервале времени эксплуатации парка однотипной техники $\Delta t_{эi}$.

В теории марковских процессов предполагается, что плотности распределения времени между соседними событиями в потоках требований являются экспоненциальными. В этом случае интенсивности переходов определены выражением:

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{T_1},$$

где $\tilde{\lambda}$ – установившееся значение интенсивности отказов.

В моделируемой СТЭ установившаяся интенсивность отказов при эксплуатации до отказа равна:

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{810,6} = 1,233 \cdot 10^{-3} / \text{ч}.$$

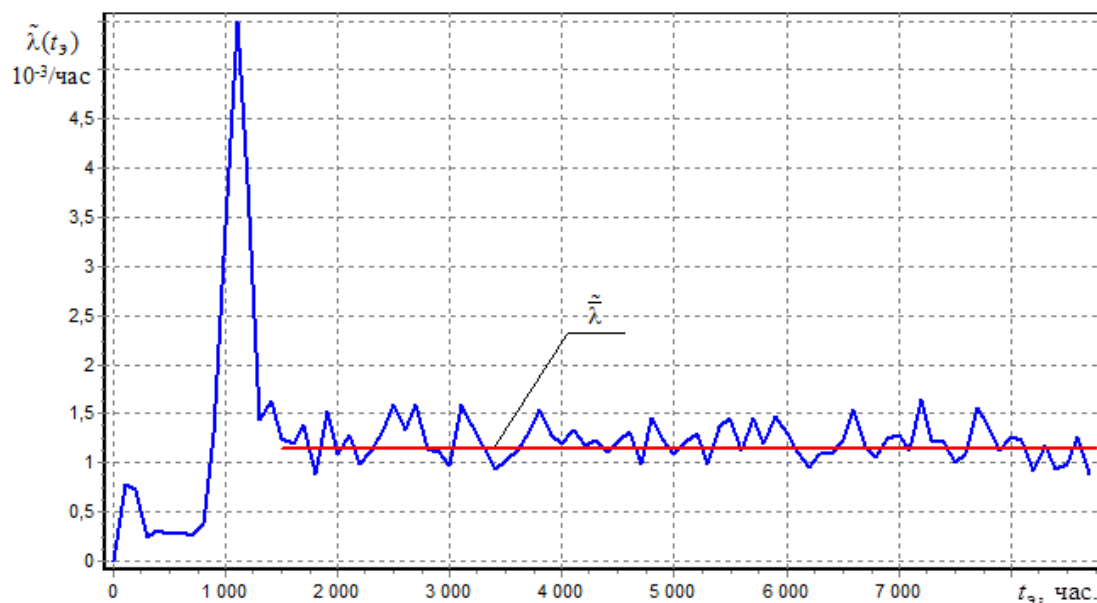


Рис. 6. График интенсивности отказов $\tilde{\lambda}(\Delta t_3)$ и установившееся значение $\bar{\lambda}^{\%}$, полученные в эксперименте по эксплуатации 300 невосстанавливаемых объектов до отказа ($T_p = 1\,400$ ч) специалистами первого класса на протяжении $T_3 = 8\,760$ ч

Fig. 6. Graph of failure rate $\tilde{\lambda}(\Delta t_3)$ and steady-state value $\bar{\lambda}^{\%}$ obtained in an experiment on the operation of 300 non-repairable objects to failure ($T_p = 1\,400$ h) by first class specialists over a period of $T_3 = 8\,760$ h

Для проверки адекватности цифрового двойника предприятия построим график зависимости (1) при эксплуатации 300 невосстанавливаемых объектов до отказа ($T_p = 1\,400$ ч) на протяжении $T_3 = 8\,760$ ч. При построении графика определим среднее значение интенсивности отказов на интервале $t_3 = (1\,500, T_3)$. Результат показан на рис. 6.

По результатам данного эксперимента получена установившаяся интенсивность отказов, равная $\bar{\lambda}^{\%} = 1,136 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$. При этом погрешность оценки $\bar{\lambda}^{\%}$ по сравнению с $\bar{\lambda}$ составила чуть менее 9 %, что является допустимой статистической погрешностью, поскольку в наших исследованиях большой интерес представляют именно качественные оценки «больше – меньше» и т.п.

Относительно большая погрешность в данном эксперименте вызвана тем, что в идеальном эксперименте $T_3 \rightarrow \infty$, соответственно, при меньших значениях T_3 статистические погрешности будут больше и наоборот. Так, в эксперименте продолжительностью $T_3 = 43\,800$ ч (пять лет эксплуатации), оценка $\bar{\lambda}^{\%}$ составила $1,221 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$. Это дает менее 1 % погрешности.

Таким образом, равенство $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}^{\%}$ является тестовой задачей на адекватность цифрового двойника предприятия.

Установившаяся интенсивность отказов зависит от назначенного ресурса T_p [1]. Исследование подобных зависимостей имеет большое практическое значение.

Постановка задачи исследования

В результате эксперимента (см. рис. 6), пиковая интенсивность отказов при $t_3 \approx 1\,100$ ч составила примерно $5,5 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$. Это в 4,5 раза больше, чем $\bar{\lambda}$. Этот пик вызван тем, что при $t_3 \approx 1\,100$ ч начинается массовое старение объектов (см. рис. 4). При запуске объектов в эксплуатацию наработка всех объектов равна нулю. В дальнейшем, из-за того, что замена отказавших объектов происходит одновременно, наработка каждого объекта в парке становится случайной величиной, поэтому таких выбросов интенсивности отказов больше не происходит.

В этом эксперименте также был получен график зависимости размера очереди на ремонт и замену от t_3 (рис. 7).

Эксперимент показал, что на время эксплуатации $t_3 \approx 1\,100$ ч приходится максималь-

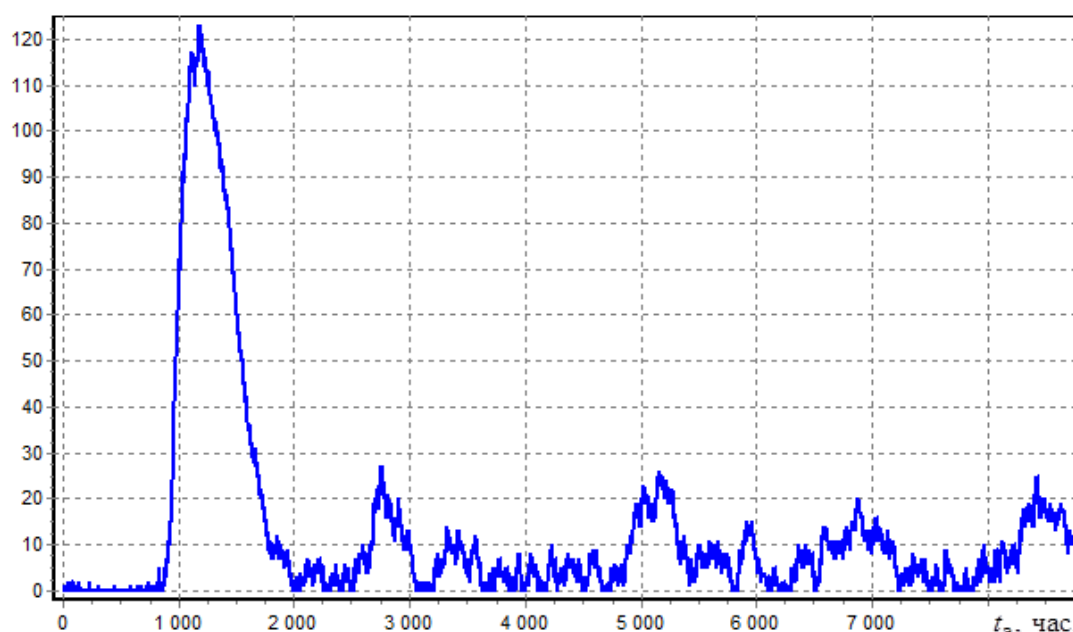


Рис. 7. Очереди на ремонт, полученные при проведении эксперимента по эксплуатации 300 невосстанавливаемых объектов до отказа ($T_p = 1\,400$ ч) специалистами первого класса на протяжении $T_s = 8\,760$ ч
Fig. 7. Queues for repairs received during an experiment on the operation of 300 non-repairable objects to failure ($T_p = 1\,400$ h) by first class specialists for $T_s = 8\,760$ h

ное значение очереди объектов на замены отказов. Пик вызван тем, что производственной мощности группы обслуживания недостаточно для выполнения массовых замен объектов после отказов.

Наличие указанных закономерностей выявляет ряд актуальных научных задач по поиску оптимальных параметров СТЭ. Ввиду большого объема полученных результатов здесь ограничимся исследованием только некоторых аспектов эксплуатации невосстанавливаемых объектов.

Оценка максимально возможного числа эксплуатируемых объектов и оптимальной загрузки группы обслуживания

Очевидно, что если поручить группе обслуживания эксплуатировать чрезмерно большой парк объектов, то группа не сможет поддерживать все объекты в исправном состоянии. Существует максимальный (предельный) объем парка технических объектов N_{\max} , при превышении которого все избыточные объекты выпадут из процесса эксплуатации. Вычисление оценки N_{\max} является важной научной и производственной задачей.

Цифровой двойник предприятия (СТЭ) может работать в следующих режимах:

1. Режим эксплуатации парка объектов без дополнительных мероприятий.
2. Режим эксплуатации парка объектов с продлением ресурса.
3. Режим эксплуатации парка объектов с организацией ступенчатой выработки ресурса.
4. Режим эксплуатации парка объектов с продлением ресурса и организацией ступенчатой выработки ресурса.

Зададим в СТЭ заведомо избыточный объем парка технических объектов, равный 350. Для каждого режима работы СТЭ выполним по десять опытов с назначенным ресурсом объектов 500–1 400 ч. Во всех случаях продолжительность эксплуатации один год или 8 760 ч. Это соответствует типовому периоду отчетности транспортной организации.

По результатам эксперимента построим графики зависимости установившейся интенсивности отказов $\lambda^{\%}(T_p)$ и максимального объема парка технических объектов $N_{\max}(T_p)$.

Анализ полученных результатов показывает, что второй и четвертый режимы вызывают некоторый рост установившейся интенсивности отказов на интервале назначенного ресурса 700–1 200 ч, вызванный продлением ресурса (рис. 8).

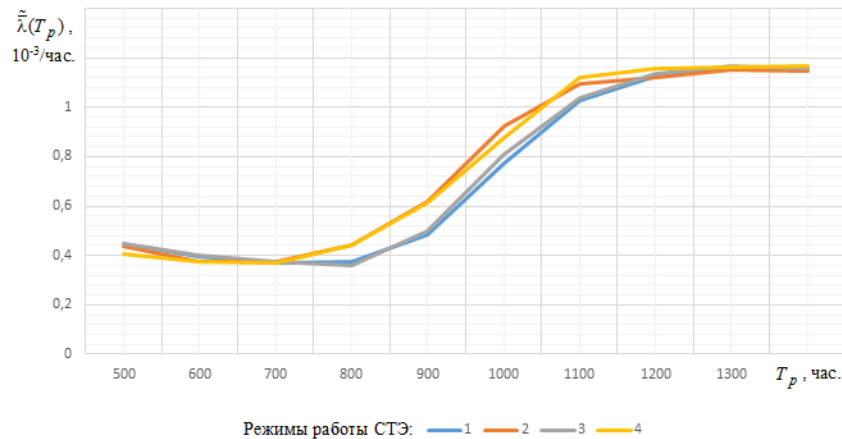


Рис. 8. Зависимость установившейся интенсивности отказов $\bar{\lambda}(T_p)$ от назначенного ресурса T_p

Fig. 8. Dependence of the steady-state failure rate $\bar{\lambda}(T_p)$ on the assigned resource T_p

В то же время продление ресурса вызывает некоторое уменьшение нагрузки на группу обслуживания, что приводит к небольшому увеличению максимального объема парка технических объектов $N_{\max}(T_p)$ (рис. 9).

На основании выполненных экспериментов можно сделать вывод, что если для данного назначенного ресурса $N_3 \leq 0,35N_{\max}$, то это слабонагруженная группа обслуживания. Если $0,35N_{\max} \leq N_3 \leq 0,75N_{\max}$, то это средненагруженная группа обслуживания. При $N_3 > 0,75N_{\max}$ имеет место сильно нагруженная (перегруженная) группа обслуживания.

Возьмем в качестве эталона на 100 % загруженную группу обслуживания, которая экс-

плуатирует парк изделий объемом $N_{\max}(T_p)$. Исследование производственных показателей транспортной организации с помощью цифрового двойника показало, что наилучшие показатели будут достигнуты при 50 %-ной нагрузке группы $N_{50\%}$ (табл.).

Заключение

В данной работе представлены результаты поиска варианта оптимальной загрузки группы обслуживания. На данный момент получение подобных результатов каким-либо другими методами исследования, кроме цифрового двойника предприятия, не представляется возможным. Однако на этом возможности

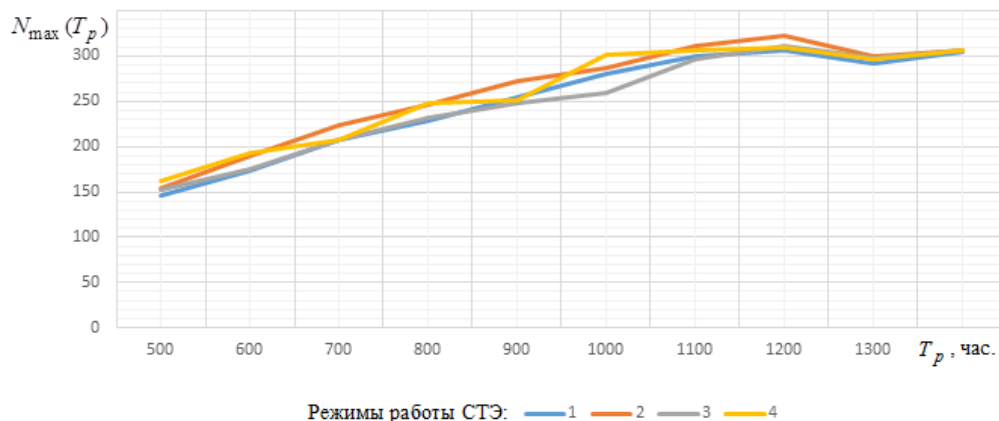


Рис. 9. Зависимость максимального объема парка технических объектов N_{\max} от назначенного ресурса T_p

Fig. 9. Dependence of the maximum volume of a fleet of technical objects N_{\max} on the assigned resource T_p

Зависимость максимальной и 50%-ной загрузок группы обслуживания в зависимости от назначенного ресурса
Dependence of maximum and 50 % loads of the service group depending on the assigned resource

T_p , ч	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400
N_{\max} , шт.	146	174	207	228	255	281	299	307	292	305
$N_{50\%}$, шт.	73	87	104	114	128	141	150	154	146	153

цифрового двойника предприятия далеко не исчерпаны. Модель при вводе соответствующих исходных данных позволяет решать целый ряд производственных задач, далеко выходящих за рамки данной работы. Представленный в статье цифровой двойник предприятия может использоваться не только на производстве, но и при изучении ряда технических дисциплин бакалавриата, специалитета и ма-

гистратуры, например таких как «Техническая надежность», «Техническая диагностика», «Организация перевозок и управление на транспорте» (железнодорожный транспорт) и др. Кроме того, цифровой двойник предприятия может использоваться в качестве тренажера для обучения, переподготовки инженерных руководящих кадров на транспорте.

Список литературы

1. Кашковский В.В. Исследование законов функционирования систем технической эксплуатации промышленных и транспортных объектов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. 312 с.
2. Солнышкина И.В. Теория систем массового обслуживания. Комсомольск-на-Амуре : КнАГТУ, 2015. 76 с.
3. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М. : Машиностроение, 1979. 432 с.
4. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М. : РУДН, 1995. 528 с.
5. Беляев Ю.К. Массового обслуживания теория // Большая российская энциклопедия : сайт. URL : <https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2191088> (Дата обращения 30.08.2024).
6. Боровков А.А. Асимптотические методы в теории массового обслуживания. М. : Наука, 1980. 381 с.
7. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. М. : Высшая школа, 1982. 256 с.
8. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М. : Наука, 1987. 336 с.
9. Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М. : Советское радио, 1969. 399 с.
10. Лабскер Л.Г., Бабешко Л.О. Теория массового обслуживания в экономической сфере. М. : Банки и биржи ; ЮНИТИ, 1998. 318 с.
11. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания. М. : Физматгиз, 1963. 236 с.
12. Чернецкий В.И. Математическое моделирование стохастических систем. Петрозаводск : ПГУ, 1994. 485 с.
13. Handbuch der Bedienungstheorie II : Formeln und andere Ergebnisse / K. Arndt, U. Arndt, G.P. Bascharin u.a. Berlin : Akademie-Verlag, 1984. 608 s.
14. Борисевич А.В., Дякин Н.В. Полумарковская модель для оценки показателей надежности источника бесперебойного питания дата-центра // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 8-1 (52). С. 23–27.
15. Зеленый О.В., Носовский А.В., Стадник О.А. Полумарковские модели в задачах оценки надежности и риска от эксплуатации АЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций та Чернобиля. 2007. № 7. С. 30–40.
16. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев : Наук. думка, 1976. 184 с.
17. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы Марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев : Наук. думка, 1982. 235 с.
18. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.М. Новиков и др. Кишинев : Штиинца, 1991. 275 с.
19. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М. : Советское радио, 1975. 471 с.
20. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь : СевГТУ, 2000. 286 с.
21. Ахмедов Г.М., Асланов Д.Г. Применение полумарковских моделей восстанавливаемых систем для расчета основных показателей надежности электровозов переменного тока // Universum: технические науки. 2018. № 3 (48). С. 72–77.
22. Grabski F. Applications of semi-Markov processes in reliability // Reliability: Theory & Applications. 2007. Vol. 2. № 3-4 (7). P. 66–75.
23. Grabski F. Semi-Markov failure rates processes // Applied Mathematics and Computation. 2011. Vol. 217. Iss. 24. P. 9956–9965. DOI:10.1016/j.amc.2011.04.055.
24. Limnios N., Oprisan G. Semi-Markov Processes and Reliability. Boston : Birkhauser, 2001. 225 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0161-8.

References

1. Kashkovskii V.V. Issledovanie zakonov funktsionirovaniya sistem tekhnicheskoi ekspluatatsii promyshlennykh i transportnykh ob'ektov [Research of the laws of functioning of technical operation systems of industrial and transport facilities]. Saarbrücken: Lambert Academic Publ., 2012. 312 p.
2. Solnyshkina I.V. Teoriya sistem massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing systems]. Komsomol'sk-on-Amur: KnAGTU Publ., 2015. 76 p.
3. Kleinrock L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 432 p.
4. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. Moscow: RUDN Publ., 1995. 528 p.
5. Belyaev Yu.K. Massovogo obsluzhivaniya teoriya (elektronnyi resurs) [Theory of queuing (electronic resource)]. Available at: <https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2191088> (Accessed August 30, 2024).
6. Borovkov A.A. Asimptoticheskie metody v teorii massovogo obsluzhivaniya [Asymptotic methods in queuing theory].

Moscow: Nauka Publ., 1980. 381 p.

7. Ivchenko G.I., Kashtanov V.A., Kovalenko I.N. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing theory]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1982. 256 p.

8. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya [Introduction to queuing theory]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 336 p.

9. Novikov O.A., Petukhov S.I. Prikladnye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya [Applied issues of queuing theory]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1969. 399 p.

10. Labsker L.G., Babeshko L.O. Teoriya massovogo obsluzhivaniya v ekonomicheskoi sfere [The theory of queuing in the economic sphere]. Moscow: Banki i birzhi Publ.; UNITI Publ., 1998. 318 p.

11. Khinchin A.Ya. Raboty po matematicheskoi teorii massovogo obsluzhivaniya [Proceedings on the mathematical theory of queuing]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1963. 236 p.

12. Chernetskii V.I. Matematicheskoe modelirovanie stokhasticheskikh sistem [Mathematical modeling of stochastic systems]. Petrozavodsk: PGU Publ., 1994. 485 p.

13. Arndt K., Arndt U., Bascharin G.P. usw. Handbuch der Bedienungstheorie II : Formeln und andere Ergebnisse. Berlin : Akademie-Verlag Publ., 1984. 608 s.

14. Borisevich A.V., Dyakin N.V. Polumarkovskaya model' dlya otsenki pokazatelei nadezhnosti istochnika bescpereboinogo pitaniya data-tsentra [Semi-Markov model for assessing the reliability indicators of an uninterruptible power supply for a data center]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific research and innovation], 2015, no 8-1 (52), pp. 23–27.

15. Zelenyi O.V., Nosovskii A.V., Stadnik O.A. Polumarkovskie modeli v zadachakh otsenki nadezhnosti i riska ot ekspluatatsii AES [Semi-Markov models in problems of reliability and risk assessment from NPP operation]. *Problemi bezpeki atomnikh elektrostantsii ta Chornobilya* [Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl], 2007, no 7, pp. 30-40.

16. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniya [Semi-Markov Processes and Their Applications]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1976. 184 p.

17. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Protsessy Markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem [Markov Recovery Processes in Problems of System Reliability]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1982. 235 p.

18. Korlat A.N., Kuznetsov V.N., Novikov M.M., Turbin A.F. Polumarkovskie modeli vosstanavlivaemykh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya [Semi-Markov models of recoverable systems and queuing systems]. Chisinau: Shtiintsa Publ., 1991. 275 p.

19. Kozlov B.A., Ushakov I.A. Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki [Handbook of Reliability Calculation for Radio Electronics and Automation Equipment]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1975. 471 p.

20. Kopp V.Ya., Obzherin Yu.E., Peschanskii A.I. Stokhasticheskie modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniem [Stochastic models of automated production systems with time reservation]. Sevastopol': SevGTU Publ., 2000. 286 p.

21. Akhmedov G.M., Aslanov D.G. Primenenie polumarkovskikh modelei vosstanavlivaemykh sistem dlya rascheta osnovnykh pokazatelei nadezhnosti elektrovozov peremennogo toka [Application of semi-Markov models of recoverable systems for calculating the main reliability indicators of AC electric locomotives]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences], 2018, no 3 (48), pp. 72–77.

22. Grabski F. Applications of semi-Markov processes in reliability // Reliability: Theory & Applications, 2007, Vol. 2, no 3-4 (7), pp. 66–75.

23. Grabski F. Semi-Markov failure rates processes // Applied Mathematics and Computation, 2011, Vol. 217, iss. 24, pp. 9956–9965. DOI: 10.1016/j.amc.2011.04.055.

24. Limnios N., Oprisan G. Semi-Markov Processes and Reliability. Boston: Birkhauser Publ., 2001. 225 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0161-8.

Информация об авторах

Каишковский Виктор Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Краковский Юрий Мечеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

Начигин Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

Назаров Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных систем, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург; e-mail: NazPS@yandex.ru.

Information about the authors

Victor V. Kashkovskii, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskij@mail.ru.

Yurii M. Krakovskii, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

Vladimir A. Nachigin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

Pavel S. Nazarov, Assistant Professor of the Department of Radioelectronic Systems, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Air Chief Marshal A.A. Novikov, Saint Petersburg; e-mail: NazPS@yandex.ru.