

Имитационное моделирование процесса транспортировки звеньев рельсошпальной решетки на путевых тележках

Д. И. Адволовткін¹, Г. А. Верстак¹

¹Научно-исследовательский испытательный центр Железнодорожных войск Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия
Advolotkin1@mail.ru

Аннотация. Процесс создания перспективных технических средств всегда базируется на результатах ранее проведенных исследований, посвященных определению и обоснованию технических требований, предъявляемых к разрабатываемым образцам. Использование современных методов имитационного (компьютерного) моделирования на этапе выполнения научно-исследовательских работ помогает провести анализ множества доступных вариантов реализации разрабатываемых систем, оценить степень нагрузки на их отдельные элементы, сформировать обоснованные предложения по способам функционирования и составу. В статье изложен один из способов применения метода имитационного моделирования, разработанный для оценки эффекта, получаемого при изменении количества путевых железнодорожных тележек, используемых для подачи звеньев рельсошпальной решетки к месту их укладки. Оценка выполняется на основании тактико-технических характеристик перспективного портального тракторного путеукладчика. Результатом моделирования являются статистические данные временных показателей процесса укладки рельсошпальной решетки. Разработанная имитационная модель позволяет на этапе проведения научно-исследовательской работы, посвященной созданию мобильных средств для укладки железнодорожного пути, в условиях дефицита исходных данных и сложности проведения натурного эксперимента с реальными объектами выполнить расчет времени производства отдельных технологических циклов. Для этого необходимо оценить степень загруженности производственных мощностей и математически обосновать оптимальное количество задействованных транспортировочных средств в целях снижения времени простоя технических средств, используемых на погрузочных и путеукладочных работах. В качестве исходных данных взяты основные технические характеристики перспективного тракторного путеукладчика ПБ-5, путевых железнодорожных тележек ПТ-13, универсальных устройств для постановки на железнодорожный путь автомобильной и пневмоколесной техники. Исследуемый производственный процесс моделировался исходя из принятых вариантов организации и технологии выполнения работ согласно технологической карте «Укладка путеукладчиком рельсошпальной решетки звеньями», включенной в «Сборник технологических карт выполнения путевых работ». Разработанная модель может выступать в роли источника статистических данных для организационно-связанных многоузловых многоканальных моделей функционирования формирований транспортного строительства, включающих в себя несколько уровней представления функционирования системы.

Ключевые слова: имитационное моделирование, сеть массового обслуживания, система массового обслуживания, путевая железнодорожная тележка, тракторный путеукладчик, рельсошпальная решетка, укладка рельсошпальной решетки

Для цитирования: Адволовткін Д. И., Верстак Г. А. Имитационное моделирование процесса транспортировки звеньев рельсошпальной решетки на путевых тележках // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 2. С. 44–59. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-2-44-59

Simulation modeling of the process of transportation of track panels on track railway trolleys

D. Advolotkin¹, G. Verstak¹

¹Research and Testing Center of Railway Troops Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia
Advolotkin1@mail.ru

Abstract. The process of creating promising technical means is always based on the results of previous studies devoted to the definition and justification of the technical requirements for the samples being developed. The use of modern methods of simulation (computer) modeling at the stage of research works helps to analyze the many available options for the implementation of the developed systems, assess the degree of load on their individual elements, form reasonable proposals for the methods of functioning and composition. The article describes one of the ways of applying the simulation modeling method, developed in order to assess the effect obtained due to a change in the number of track railway trolleys used to feed the links of the rail grid to the place of their laying. The assessment is carried out on the basis of the tactical and technical characteristics of a promising portal tractor track-laying machine. The result of the simulation is the statistical data of the time indicators of the process of laying the rail grating. The developed simulation model makes it possible to calculate the production time of individual technological cycles at the stage of research work devoted to the creation of mobile means for laying railway tracks, in conditions of a shortage of initial data and the complexity of conducting a full-scale experiment with real objects. To analyze the degree of utilization of production facilities and mathematically substantiate the optimal number of transportation means involved, in order to reduce the downtime of technical means involved in loading and track laying works. As initial data, the main technical characteristics of the promising PB-5 tractor track-laying machine, PT-13 track railway trolleys, universal devices for placing automotive and pneumatic wheeled vehicles on the railway track are taken. The production process under study was modeled based on the accepted options for the organization and technology of work according to the technological map "Laying a track panels by links" included in the "Collection of technological maps of track work". The developed model can act as a source of statistical data for organizationally related multi-node, multi-channel models of the functioning of transport construction formations, which include several levels of representation of the functioning of the system.

Keywords: simulation modeling, queuing service, queuing system, track railway trolley, rail tracklayer machine, rail track panels, laying of a rail track panels

For citation: Advolotkin D., Verstak G. Simulation modeling of the process of transportation of track panels on track railway trolleys. *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2023, vol.18, no.2, pp.44-59 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-2-44-59

Введение

Основным задачам, решаемым Железнодорожными войсками (далее – ЖДВ), относятся: восстановление разрушенных, строительство новых и ремонт существующих железнодорожных путей. Их выполнение непосредственно связано с производством

работ по укладке (демонтажу) рельсошпальной решетки верхнего строения пути. Для выполнения указанных технологических операций подразделения Железнодорожных войск используют путеукладчики тракторные ПБ-3М (ПБ-3М1, ПБ-3М2), на замену которым в настоящее время разработан путеукладчик ПБ-5.

При укладке верхнего строения пути звеневым способом с использованием порталных тракторных путеукладчиков звенья рельсошпальной решетки доставляются к месту производства работ на путевых тележках (далее – ПТ). Одной из задач организации путеукладочных работ является определение оптимального количества путевых тележек, выделяемых под транспортировку пакетов рельсошпальной решетки.

Рельсошпальная решетка (далее – РШР) с рельсами типа Р65 на железобетонных шпалах укладывается, как правило, звеньями длиной 25 метров. Транспортировка РШР осуществляется пакетами по три звена на четырех путевых тележках ПТ-13. В качестве тягача используется автомобильный транспорт, оборудованный универсальным устройством комбинированного хода, обеспечивающим возможность его движения по железнодорожному пути. Погрузка пакетов шпал на путевые тележки выполняется кранами, выгрузка на месте производства работ осуществляется путеукладчиком. В соответствии с принятой технологией среднее время укладки одного звена РШР составляет 495 секунд.

Для поддержания заданных темпов производства работ по укладке верхнего строения железнодорожного пути необходимо иметь оптимальное количество ПТ и грузовых автомобилей на комбинированном ходу.

В настоящей статье описываются аналитическая и имитационная модели, которые можно использовать для оценки темпов производства работ по укладке РШР и времени простоя путеукладчика в зависимости от удаленности склада РШР и количества имеющихся ПТ. Оценка производилась исходя из тактико-технических характеристик имеющихся на снабжении ЖДВ путеукладчиков и ПТ, а также принятых технологий производства работ. Темп производства работ в этом случае будет выступать в качестве основного целевого показателя эффективности функционирования системы [1].

Описание имитационной модели

Оценка задержек путеукладчика выполняется посредством измерения времени, затрачиваемого на погрузку и транспортировку пакетов РШР от места их хранения к месту укладки. Время выполнения путеукладчиком операций по укладке звена РШР изменяется в зависимости от следующих условий:

- очередное звено РШР находится на путевых тележках в месте производства работ;
- очередное звено РШР находится на погрузке (в пути), прежде чем достигает места укладки.

При описании аналитической модели работы портального путеукладчика приняты следующие исходные данные: погрузка пакета звеньев РШР (в одном пакете 3 звена РШР) на путевые тележки занимает в среднем от 15 до 16 мин при использовании одного автомобильного крана [2], скорость буксировки пакета грузовым автомобилем, оборудованным комбинированным ходом, составляет 5–5,5 км/ч, время разгрузки и укладки одного звена РШР – 8–8,5 мин (для пакета – 24–25,5 мин). Также учитывалось, что в процессе укладки плечо подвоза увеличивалось на 75 м после укладки каждого пакета РШР. Время производства данных операций определено на основании «Сборника нормативов по тактико-специальной и специальной подготовке подразделений Железнодорожных войск» и результатов проведения контрольных занятий в воинских частях ЖДВ. В связи с тем, что задача определения потребной интенсивности поступления звеньев РШР (для последующей транспортировки) не ставилась, принято, что в любой момент времени наличие РШР на складе всегда превышает текущую потребность.

В разработанной модели поток пакетов РШР представлен как поток требований в сети массового обслуживания (далее – СеМО) замкнутого типа. В качестве источника заявок выступает склад РШР (нулевой узел графа), первый узел моделирует

процесс погрузки пакетов РШР на путевые тележки, второй отвечает за моделирование транспортировки пакетов к месту работы путеукладчика, третий воспроизводит процессы по укладки звеньев РШР в путь и четвертый моделирует перемещение тележек к месту погрузки очередного пакета РШР. Граф СеМО представлен на рисунке 1.

Согласно [3] расчет характеристик функционирования разомкнутой СеМО может быть выполнен через ее представление в виде n независимых экспоненциальных систем массового обслуживания (далее – СМО) типа M/M/N. Интенсивность входящего потока в узел j ($j = 1, n$) СеМО определяется как произведение входящего в сеть потока и коэффициента передачи узла: $\lambda_j = \alpha_j \lambda_0$. При этом характеристики СМО, входящих в СеМО, являются ее узловыми характеристиками.

Первый узел СеМО отвечает за моделирование процесса погрузки звеньев РШР на путевые тележки. С учетом принятых ограничений (использование одного крана) он представляет собой одноканальную СМО. Заявки на обслуживание формируются исходя из количества имеющихся в наличии готовых звеньев РШР. Соответственно, заявки, поступающие в модель, можно представить в виде простейшего однородного потока с интенсивностью, зависящей от времени обслуживания в СМО. В свою очередь, время обслуживания (погрузки звеньев на путевые тележки) распределено по экспоненциальному закону [2, 4] со средним значением 15 мин 30 сек., причем $b\lambda < 1$, то есть система работает в уст-

новившемся режиме. В соответствии с классификацией Кендалла¹ [5–7] (табл. 1) данная СМО имеет вид M/M/1 и является одноканальной с накопителем неограниченной емкости, в которую поступает однородный поток заявок с экспоненциальным распределением интервалов времени между последовательными заявками и экспоненциальной длительностью обслуживания заявок. Очевидно, что пакетов РШР на погрузку подчиняется правилу: обслуживание в порядке поступления (ОПП или FIFO – First in First Out), когда на обслуживание выбирается заявка, поступившая в систему раньше других.

Основные характеристики СМО с однородным потоком заявок определялись следующими соотношениями:

- нагрузка системы:

$$\theta = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda b; \quad (1)$$

- среднее число пакетов РШР в системе:

$$L = \frac{\theta}{1 - \theta}; \quad (2)$$

- средняя длина очереди:

$$l_j = \frac{\theta^2}{1 - \theta}; \quad (3)$$

¹ Кодовая (символьная) классификация Д. Кендалла, характеризующая характеристику системы. Согласно символике Д. Кендалла, обозначение имитационной модели состоит из четырех (пяти) символов, разделенных вертикальными чертами [//]: на первой позиции обозначается статистическая характеристика входного потока M (Markovian) – экспоненциальное (показательное) распределение, на второй – обслуживающего потока, на третьей – число параллельно работающих каналов обслуживания, на четвертой – число мест ожидания в очереди перед системой.

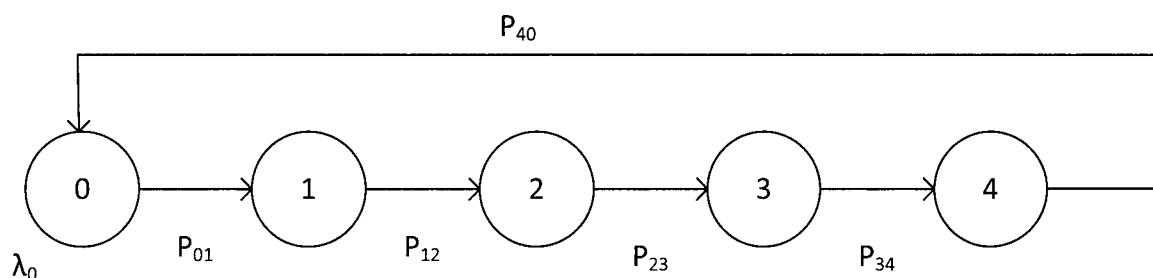


Рис. 1. Граф сети массового обслуживания
Fig. 1. Graph of the queuing network

Таблица 1. Основные обозначения Д. Кендалла

Обозначение <i>Designation</i>	Пояснение <i>Explanation</i>
P_0	Вероятность начального состояния системы (система свободна)
P_i	Вероятность того, что в очереди находится ($i - 1$) заявок
θ	Нагрузка системы
ρ	Загрузка системы
η	Коэффициент простоя
K	Количество каналов в системе
l_j	Средняя длина очереди
L	Среднее число заявок в системе
N	Число заявок в состоянии ожидания
W_j	Среднее время ожидания в очереди
w	Среднее время ожидания в системе
M	Символ, обозначающий, что поток заявок с экспоненциальным распределением интервалов времени между последовательными заявками и экспоненциальной длительностью обслуживания заявок
c	Число каналов обслуживания
μ	Интенсивность обслуживания заявок
λ	Интенсивность поступления заявок на обслуживание
b	Средняя длительность обслуживания

- среднее время ожидания в очереди:

$$w_j = \frac{\theta}{\mu(1-\theta)}; \quad (4)$$

- среднее время ожидания в системе:

$$w = \frac{1}{\mu(1-\theta)}; \quad (5)$$

- загрузка:

$$\rho = \min \frac{\theta}{\kappa}; \quad (6)$$

- коэффициент простоя:

$$\eta = 1 - \rho. \quad (7)$$

Среднесуточный темп укладки, при условии начала укладки непосредственно с места расположения базы хранения РШР и организации работ в одну 10-часовую смену, составляет 11 пакетов (по три звена РШР в каждом) в сутки. Соответственно, интенсивность потока заявок на погрузку пакетов РШР на ПТ будет также равна 11. В соответствии с формулой (1)

$$\theta = \frac{11}{92,9} = 0,1184 < 1.$$

Неравенство $\theta < 1$ указывает на то, что рост очереди будет ограничен.

Определим среднесуточное время ожидания в очереди:

$$w_j = \frac{0,1184}{92,9(1-0,1184)} = \\ = 0,00144 \text{ сут., или } 2,08 \text{ мин.}$$

Также вычислим среднее время ожидания в системе:

$$w = \frac{1}{92,9(1-0,1184)} = \\ = 0,01221 \text{ сут., или } 17,58 \text{ мин.}$$

Приведенные выше расчеты выполнены при условии производства работ в течение одних суток и начале выполнения укладки РШР непосредственно в районе ее хранения. В связи с тем, что изменение расстояния между местом хранения РШР и точкой

начала ее укладки повлечет за собой изменение значений времени транспортировки и, как следствие, интенсивности поступления заявок на погрузку, были выполнены расчеты основных параметров СМО для различных значений данных параметров (табл. 2). Также это определяет возможность использования предлагаемого аналитического метода расчета параметров системы только для суточного цикла ее функционирования.

Для определения характеристик остальных узлов СМО была построена матрица вероятностей передач заявок

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Интенсивность поступления заявок в СМО при нулевом начальном значении плеча подвоза РШР равна $\lambda_0 = 11$. Все узлы СМО одноканальные, усредненные величины продолжительности обслуживания в узлах равны: $b_0 = 0$ м, $b_1 = 15,5$ м, $b_2 = 4,28$ м, $b_3 = 25$ м, $b_4 = 4,28$ м или

$$b_0 = 0 \text{ м}, b_1 = 0,01076 \text{ сут.}, b_2 = 0,002972 \text{ сут.}, \\ b_3 = 0,01736 \text{ сут.}, b_4 = 0,002972 \text{ сут.}$$

Расчет интенсивностей потоков заявок в узлах СМО выполнялся согласно [3] с использованием следующего выражения:

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^n p_{ij} \lambda_i, \quad (8)$$

где λ_i – интенсивность входящего в i -й узел потока заявок;

p_{ij} – вероятность поступления заявки из узла i в узел j .

Расчет интенсивностей потоков выполнялся с использованием системы линейных уравнений

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= p_{40} \lambda_4 = \lambda_4 \\ \lambda_1 &= p_{01} \lambda_0 = \lambda_0 \\ \lambda_2 &= p_{12} \lambda_1 = \lambda_1 \\ \lambda_3 &= p_{23} \lambda_2 = \lambda_2 \\ \lambda_4 &= p_{34} \lambda_3 = \lambda_3 \end{aligned}.$$

Получено $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 11$. Тогда коэффициенты передачи равны $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1$.

Предельная интенсивность поступления заявок в СМО, при которой будет отсутствовать перегрузка:

Таблица 2. Значения основных параметров СМО для различных расстояний транспортировки

Table 2. The values of the main parameters of the CFR for different distances of transportation

Расстояние транспортировки пакетов РШР (м) <i>Transportation distance track panels</i>	θ	ρ	L	l_j	w_j	w	η
0	0,1184	0,11840	0,13431	0,01590	0,00144	0,01221	0,88159
500	0,1076	0,09687	0,10727	0,01039	0,00129	0,01206	0,90312
1000	0,0861	0,08611	0,09422	0,00811	0,00101	0,01177	0,91388
1500	0,0753	0,07534	0,08149	0,00614	0,00087	0,01164	0,92465
2000	0,0648	0,06458	0,06904	0,00445	0,00074	0,01150	0,93541
2500	0,0538	0,05382	0,05688	0,00306	0,00061	0,01137	0,94617
3000	0,0538	0,05382	0,05688	0,00306	0,00061	0,01137	0,94617
3500	0,0430	0,04305	0,04499	0,00193	0,00048	0,01124	0,95694
4000	0,0430	0,04305	0,04499	0,00193	0,00048	0,01124	0,95694

$$\lambda_0 < \min\left(\frac{k_1}{a_1 b_1}, \frac{k_2}{a_2 b_2}, \frac{k_3}{a_3 b_3}, \frac{k_4}{a_4 b_4}\right) = 57,6.$$

Соответственно, сеть работает без перегрузок.

Далее СeМО посредством эквивалентного преобразования представлялась в виде независимых СМО типа M/M/1, на вход которых поступают потоки заявок с интенсивностью λ_0 и длительностью обслуживания, равными $b_1 = 0,0107638$ сут., $b_2 = 0,002972$ сут., $b_3 = 0,01736$ сут., $b_4 = 0,002972$ сут.

Значения основных характеристик данных СМО, вычисленные с использованием выражений (1–7), приведены в таблице 3.

Основные сетевые характеристики СeМО определялись по следующим зависимостям:

- время ожидания в СeМО:

$$W = \sum_{j=1}^n a_j w_j = 0,00573 \text{ сут.} = 8,25 \text{ мин}; \quad (9)$$

- время пребывания в СeМО:

$$U = \sum_{j=1}^n a_j u_j = 0,03979931 \text{ сут.} = 57,31 \text{ мин}, \quad (10)$$

где u_j – время пребывания заявки в узле j , $u_j = w_j + b_j$;

- число заявок в состоянии ожидания:

$$N = \sum_{j=1}^n l_j = 0,06312; \quad (11)$$

- число заявок в СeМО:

$$M = \sum_{j=1}^n m_j = 0,437792, \quad (12)$$

где m_j – число заявок в узле j , $m_j = \lambda_j u_j$.

Таблица 3. Значения основных характеристик системы массового обслуживания

Table 3. Values of the main characteristics of the queuing system

Номер узла СeМО Queuing network node number	θ	ρ	L	l_j	w_j	w	η
1	0,1184	0,11840	0,13431	0,01590	0,00144	0,01221	0,88159
2	0,0326	0,0326	0,33698	0,00109	0,0001	0,00307	0,9674
3	0,1909	0,1909	0,23594	0,04504	0,00409	0,02145	0,8091
4	0,0326	0,0326	0,33698	0,00109	0,0001	0,00307	0,9674

(захват и освобождение ресурсов, задержка, комбинирование, группировка и т. п.). При этом возможна реализация моделей сложных динамических систем, состояние которых является функцией от текущих параметров, характеризующих состояния всех их элемен-

тов с учетом последствий их взаимодействия. Модель строилась в визуальной среде разработки с применением процессных диаграмм.

Структура модели соотносится с графом СeМО, представленным на рисунке 1. Вид ее процессной диаграммы – на рисунке 2.

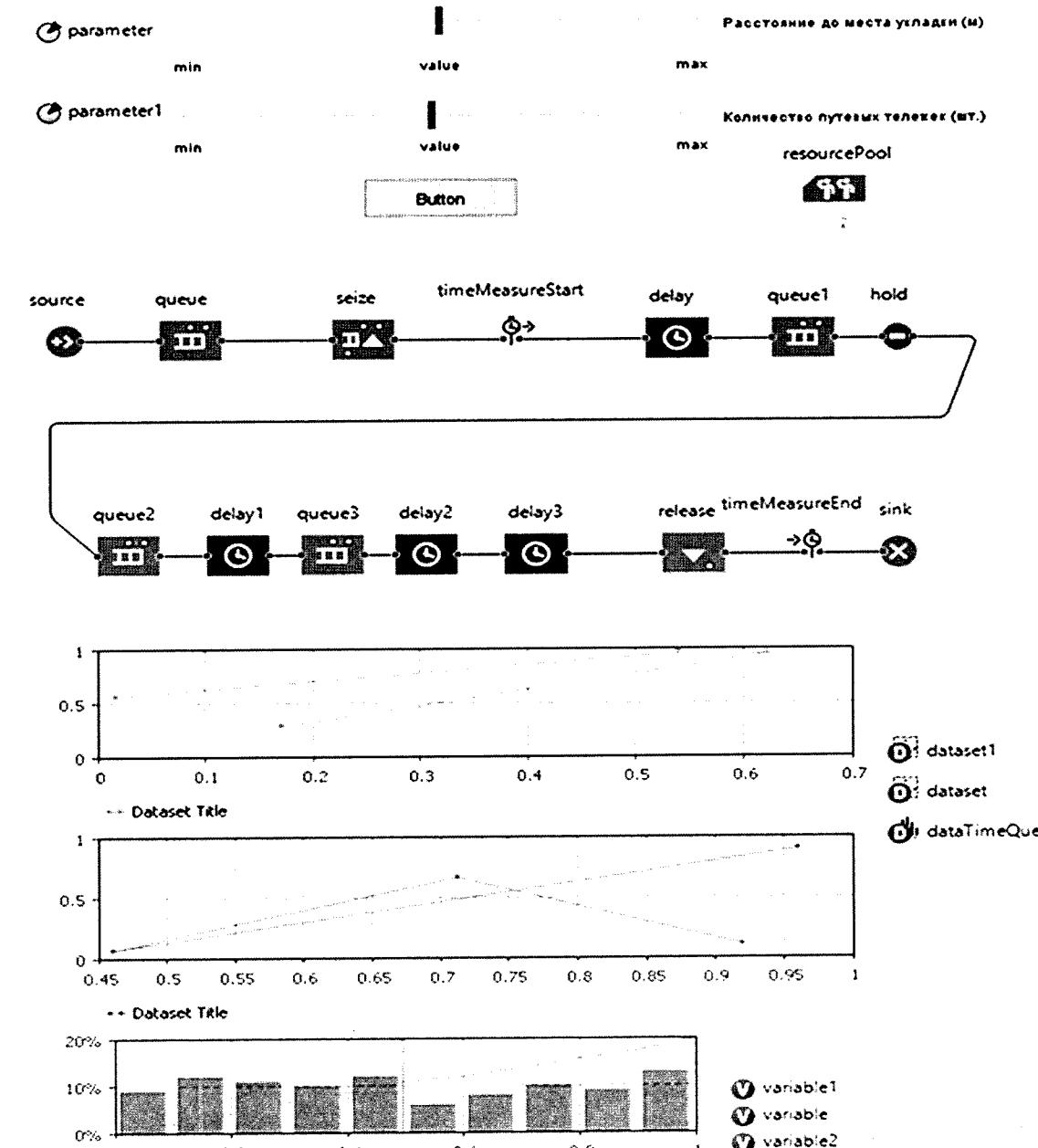


Рис. 2. Процессная диаграмма имитационной модели технологических процессов укладки рельсошпальной решетки

Fig. 2. Process diagram of the simulation model of technological processes of laying a rail-sleeper grate

В представленной диаграмме объект source отвечает за генерацию входящего в модель потока заявок (требований), формируемых на базе хранения пакетов звеньев РШР (по четыре звена в пакете). Объекты queue, queue1, queue2, queue3 моделируют очереди заявок, ожидающих обслуживания объектами, следующими за данным в потоковой диаграмме. Поступающие заявки помещаются в очередь согласно правилу FIFO; очереди без приоритетов, без вытеснения; время ожидания и емкость не ограничены. Объекты slider, slider1 позволяют задавать значения количества моделируемых путевых тележек и начальное расстояние от точки погрузки РШР до места их укладки. Объекты parameter и parameter1 обеспечивают временное хранение данных значений в процессе моделирования.

Объект seize воспроизводит процесс захвата ресурсов, в качестве которых выступают путевые тележки, требуемые для выполнения операции транспортирования пакета звеньев РШР к месту укладки. Источником ресурсов является объект resourcePool. Количество ресурсов, необходимых для обслуживания одной заявки, равно четырем. Требуемые ресурсы захватываются одновременно, то есть захват выполняется только в том случае, если в наличии имеется четыре свободные единицы ресурса. Объем имеющихся в наличии ресурсов (путевых тележек) может варьироваться путем изменения параметра «Количество ресурсов» объекта resourcePool.

Объекты delay, delay1, delay2, delay3 осуществляют задержку агентов на заданные периоды времени, соответствующие моделируемым процессам: погрузки звеньев РШР на путевые тележки, транспортировки звеньев РШР к месту укладки, укладки РШР, транспортировки пустых путевых тележек к месту отгрузки РШР. Время задержки для объектов, отвечающих за воспроизведение процессов транспортировки, вычисляется динамически; для объектов, воспроизводящих процессы погрузки и укладки РШР, задаются треугольным распределением случайной ве-

личины. Такой вид распределения определен на основании анализа данных, полученных в ходе проведения контрольных занятий. При этом оценивалась выборка из 110 значений времени погрузки пакета РШР на путевые тележки (табл. 4).

Значения теоретической функции распределения определялись по формулам:

- плотность треугольного распределения:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & x \in [a, c] \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & x \in [c, b] \\ 0 & x \in [a, b] \end{cases}$$

- функция треугольного распределения:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & x \in [a, c] \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} & x \in [c, b] \\ 1 & x > b \end{cases}$$

При этом X_1, \dots, X_n – выборка из треугольного распределения. В качестве оценки параметров a и b брались минимальный и максимальный элементы выборки: $\hat{a} = \min X_i, \hat{b} = \max X_i$.

Оценка параметра c выполнялась по методу моментов. Математическое ожидание случайной величины X , имеющей треугольное распределение:

$$MX = \frac{a+b+c}{3}.$$

MX приравнивалось к выборочному среднему:

$$\frac{a+b+c}{3} = \bar{X},$$

$$3\bar{X} = a+b+c,$$

$$c = 3\bar{X} - a - b,$$

$$\hat{c} = 3\bar{X} - \hat{a} - \hat{b}.$$

Таблица 4. Значения времени погрузки пакета РШР на путевые тележки

Table 4. The value of the time of loading of the track panels on track railway trolleys

№ п/п No.	Время погрузки Loading time		№ п/п No.	Время погрузки Loading time		№ п/п No.	Время погрузки Loading time	
	мин min	сек. sec.		мин min	сек. sec.		мин min	сек. sec.
1.	15	38	38.	15	27	75.	15	54
2.	15	27	39.	15	20	76.	15	41
3.	15	19	40.	15	28	77.	15	43
4.	15	24	41.	15	20	78.	15	17
5.	15	52	42.	15	46	79.	15	34
6.	15	3	43.	15	8	80.	15	4
7.	15	52	44.	15	33	81.	15	34
8.	15	50	45.	15	35	82.	15	19
9.	15	50	46.	15	15	83.	15	45
10.	15	49	47.	15	35	84.	15	37
11.	15	27	48.	15	55	85.	15	38
12.	15	25	49.	15	19	86.	15	30
13.	15	23	50.	15	26	87.	15	55
14.	15	30	51.	15	29	88.	15	17
15.	15	14	52.	15	24	89.	15	37
16.	15	40	53.	15	28	90.	15	42
17.	15	35	54.	15	30	91.	15	15
18.	15	17	55.	15	59	92.	15	34
19.	15	26	56.	15	34	93.	15	29
20.	15	16	57.	15	47	94.	15	13
21.	15	37	58.	15	30	95.	15	34
22.	15	41	59.	15	30	96.	15	7
23.	15	31	60.	15	28	97.	15	33
24.	15	39	61.	15	24	98.	15	11
25.	15	16	62.	15	37	99.	15	12
26.	15	29	63.	15	52	100.	15	22
27.	15	31	64.	15	19	101.	15	33
28.	15	32	65.	15	18	102.	15	44
29.	15	19	66.	15	32	103.	15	25
30.	15	34	67.	15	32	104.	15	33
31.	15	18	68.	15	33	105.	15	23
32.	15	4	69.	15	41	106.	15	45
33.	15	17	70.	15	37	107.	15	39
34.	15	18	71.	15	19	108.	15	28
35.	15	31	72.	15	21	109.	15	26
36.	15	53	73.	15	40	110.	15	22
37.	15	21	74.	15	20			

Далее были определены минимальное и максимальное значения в выборке, по формуле Стреджесса было определено число интервалов для группировки $k \approx 1 + [\log_2 n]$ и вычислена ширина интервала: $h = (b - a)/k$.

При объеме выборки $n = 110$ число промежутков $k = 7$ значение минимального элемента выборки равно 903,3, максимального – 958,62, ширина интервала для гистограммы $h = 7,9$.

Таблица 5. Интервальный ряд распределения

Table 5. Interval distribution series

№ инт. Interval num.	Левая граница Left border	Правая граница Right border	Середина интервала Middle of the interval	Число попаданий в интервал Number of hits in the interval	Относительная частота Relative frequency $\frac{n_i}{n}$	Приведенная относительная частота Reduced relative frequency $\frac{n_i}{h \cdot n}$
1	903,30	911,20	907,25	5	0,05	0,00575
2	911,20	919,11	915,15	15	0,14	0,01725
3	919,11	927,01	923,06	25	0,23	0,02876
4	927,01	934,91	930,96	30	0,27	0,03451
5	934,91	942,81	938,86	18	0,16	0,02071
6	942,81	950,72	946,77	9	0,08	0,01035
7	950,72	958,62	954,67	8	0,07	0,00920
Сумма				110	1	

Таблица 6. Плотность распределения

Table 6. Distribution density

№ инт. Interval num.	Левая граница Left border	Правая граница Right border	Середина интервала Middle of the interval	Число попаданий в интервал Number of hits in the interval	Относительная частота Relative frequency $\frac{n_i}{n}$	Приведенная относительная частота Reduced relative frequency $\frac{n_i}{h \cdot n}$	Плотность Симсона Simpson density
1	903,30	911,20	907,25	5	0,05	0,00575	0,00577455
2	911,20	919,11	915,15	15	0,14	0,01725	0,01732365
3	919,11	927,01	923,06	25	0,23	0,02876	0,02887275
4	927,01	934,91	930,96	30	0,27	0,03451	0,03270014
5	934,91	942,81	938,86	18	0,16	0,02071	0,02335724
6	942,81	950,72	946,77	9	0,08	0,01035	0,01401434
7	950,72	958,62	954,67	8	0,07	0,00920	0,00467144
Сумма				110	1		

Полученный интервальный ряд распределения приведен в таблице 5.

Далее были рассчитаны параметры распределения $a = \min X_i$, $b = \max X_i$, $\hat{c} = 3\bar{X} - \hat{a} - \hat{b}$: выборочное среднее 929,9863; оценка параметров $a = 903,3$, $b = 958,62$, $c = 928,04$.

На основании полученных оценок в средних точках была вычислена плотность распределения (табл. 6).

Полученная гистограмма распределения приведена на рисунке 3.

Далее была рассчитана статистика критерия:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i},$$

где n_i – наблюдаемая частота попадания в i -й интервал;

p_i – теоретическая вероятность попадания в i -й интервал.

Результаты приведены в таблице 7. Вероятность попадания в интервал $[d_i; d_{i+1}]$ вычислялась как $F(d_{i+1}) - F(d_i)$.

$$\chi^2 = 5,02.$$

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы

$$m - l - 1 = 7 - 3 - 1 = 3$$

было найдено критическое значение статистики как критическая точка распределения $\chi^2(3)$ уровня $\alpha = 0,05$, равное 7,815.

Полученное неравенство $5,02 < 7,812$ позволило подтвердить гипотезу о треугольном виде распределения.

Объект dataset обеспечивает формирование двухмерного массива измерений. Каждое измерение, внесенное в набор данных, имеет два значения: расстояние в метрах от места погрузки РШР на путевые тележки до места укладки; текущее модельное время.

Объект dataset1 также формирует двухмерный массив, в котором сохраняются: порядковый номер последнего уложенного пакета РШР; временной промежуток, прошедший с момента укладки предыдущего пакета РШР.

Объекты timeMeasureStart и timeMeasureEnd составляют пару объектов, отвечающих за измерение времени, проведенного агентами между двумя точками диаграммы процесса. С их помощью измеряется длительность пребывания агента в моделируемом процессе с момента появления свободных путевых тележек до их возвращения на базу хранения РШР.

Для наглядного представления результатов моделирования используются два графика и гистограмма:

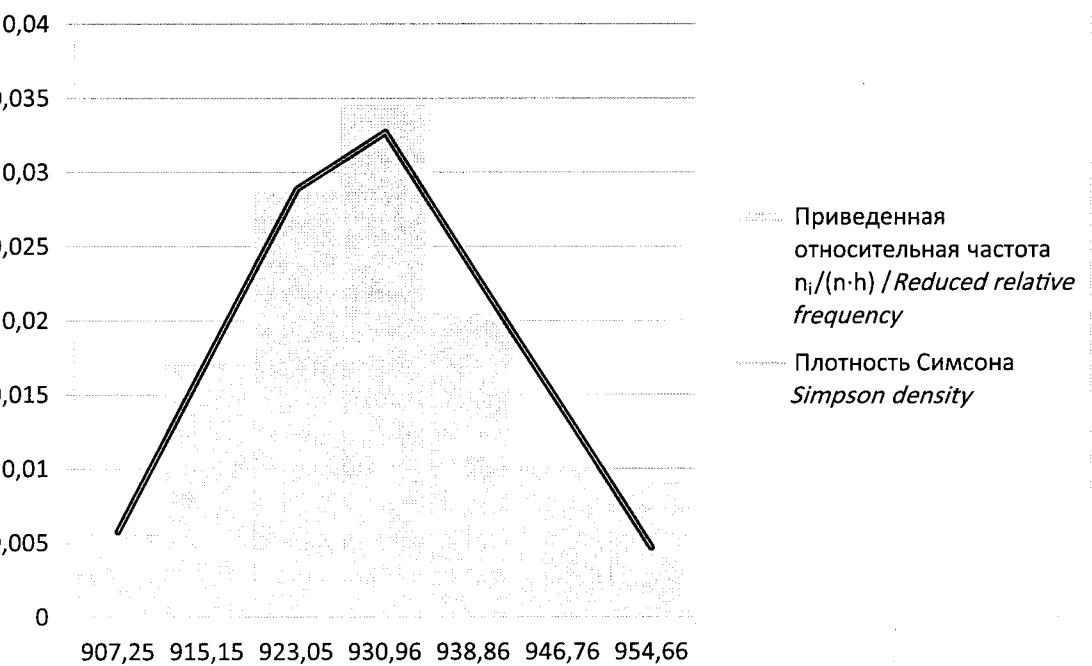
**Рис. 3.** Гистограмма распределения

Fig. 3. Distribution histogram

Таблица 7. Вероятность попадания в интервал
Table 7. Probability of falling into the interval

№ инт. Interval num.	Левая граница Left border	Правая граница Right border	Число попаданий в интервал Number of hits in the interval	$F(d_i)$	$F(d_{i+1})$	Теоретическая вероятность <i>Theoretical probability</i>	Ожидаемое число попаданий <i>Expected number of hits</i>	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
								p_i
	d_i	d_{i+1}	n_i					
1	903,30	911,20	5	0,0000	0,0456	0,0456	5,0199	0,0001
2	911,20	919,11	15	0,0456	0,1825	0,1369	15,0597	0,0002
3	919,11	927,01	25	0,1825	0,4107	0,2282	25,0995	0,0004
4	927,01	934,91	30	0,4107	0,6677	0,2570	28,2723	0,1056
5	934,91	942,81	18	0,6677	0,8523	0,1846	20,3048	0,2616
6	942,81	950,72	9	0,8523	0,9631	0,1108	12,1829	0,8316
7	950,72	958,62	8	0,9631	1,0000	0,0369	4,0610	3,8208
			110			1	110	5,020

- chart1 – отображает по оси X порядковый номер последнего уложенного пакета РШР, а по оси Y – временной промежуток, прошедший с момента укладки предыдущего пакета РШР;
- chart2 – отображает по оси X расстояние в метрах от места погрузки РШР на путевые тележки до места укладки, на оси Y – текущее модельное время;
- гистограмма chart, отображающая функцию плотности вероятности, интегральную функцию распределения и линию среднего значения времени, затрачиваемого на один цикл обработки заявки.

Вычислительный эксперимент

С помощью построенной модели был проведен вычислительный эксперимент.

Исходные параметры задавались аналогичные принятым при выполнении аналитических расчетов. Интенсивность поступления заявок – 11 за 10 часов, количество имеющихся путевых тележек – 4. Время погрузки пакетов РШР на путевые тележки задана треугольным распределением со значениями: минимальное – 15 мин 3 сек., максимальное – 15 мин 59 сек., наиболее ве-

роятное – 15 мин 28 сек. Время транспортировки звеньев РШР к месту укладки вычисляется динамически с учетом изменения расстояния подвоза в процессе укладки, скорость движения задается также треугольным распределением со значениями: минимальная – 5 км/ч, максимальная – 5,5 км/ч, наиболее вероятная – 5,25 км/ч. Также задано и время разгрузки и укладки одного звена РШР, оно составляет: минимальное – 8 мин, максимальное – 8,5 мин, наиболее вероятное – 8,25 мин (для пакета соответственно 24, 25,5 и 24,75 мин).

В результате эксперимента общее время выполнения 11 заявок составило 539 мин. Продолжительность пребывания заявок в системе в ходе эксперимента нарастала (рис. 4), это связано с ростом плеча подвоза РШР к месту укладки. Среднее время пребывания одной заявки составляет 49,13 мин, среднее медианное – 49,08 мин. Время пребывания одной заявки в очереди в ожидании обслуживания равнялось 0. Число заявок, одновременно находившихся в сети, равно единице.

Далее был выполнен эксперимент с количеством путевых тележек, равным 8. В результате эксперимента общее время выполнения 11 заявок составило 395 мин.

Продолжительность пребывания заявок в системе в ходе эксперимента нарастала (рис. 5).

Как видно из полученных результатов, время нахождения единичной заявки в системе выросло, но при этом общее время обработки пакета заявок сократилось. Это связано с тем, что в модели отсчет времени нахождения заявки в системе начинается

с момента ее выхода из объекта seize, воспроизводящего процесс захвата ресурсов, в качестве которых выступают путевые тележки, и завершается в момент высвобождения данного ресурса. Соответственно, во втором случае заявки фактически обслуживаются парно, за исключением последней нечетной заявки № 11.

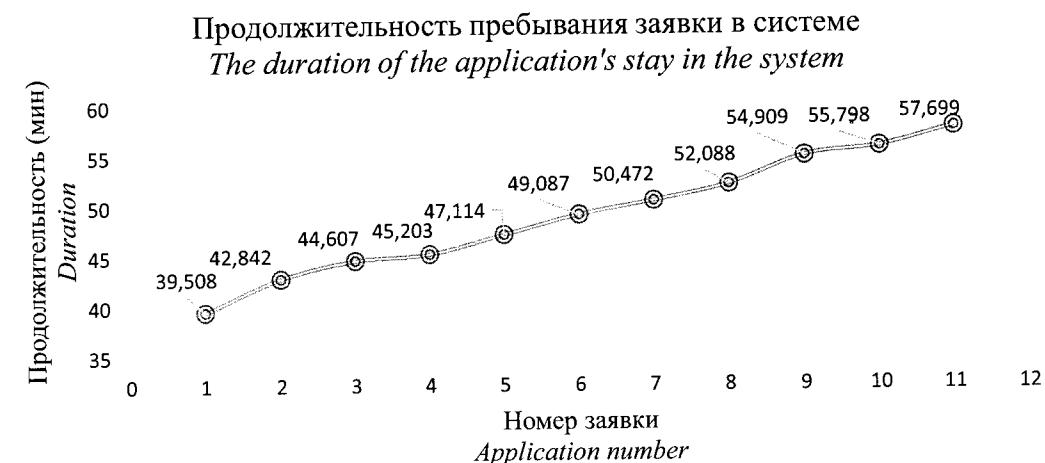


Рис. 4. График зависимости времени пребывания заявки в системе от ее порядкового номера для 4 путевых тележек

Fig. 4. The schedule of the dependence of the time of stay of the application in the system on its serial number for 4 track railway trolleys

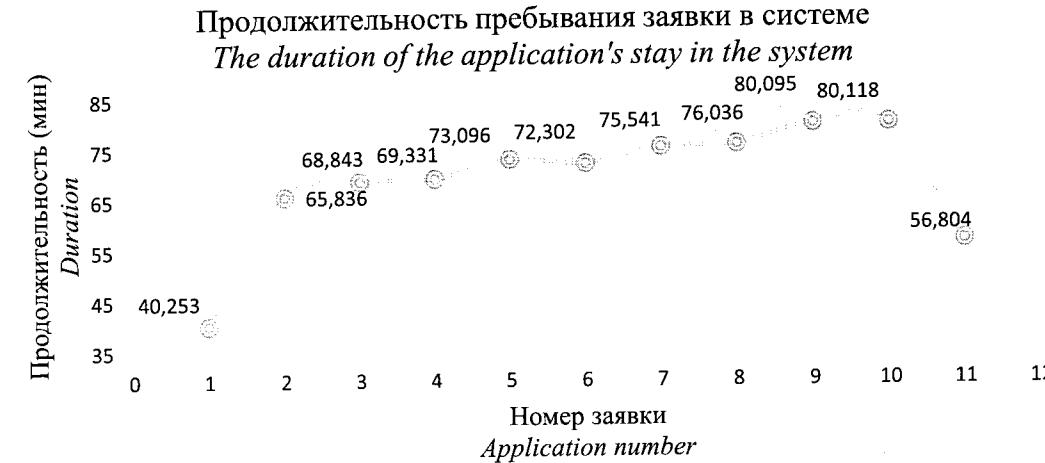


Рис. 5. График зависимости времени пребывания заявки в системе от ее порядкового номера для 8 путевых тележек

Fig. 5. The schedule of the dependence of the time of stay of the application in the system on its serial number for 8 track railway trolleys

Полученные в ходе вычислительных экспериментов данные были сопоставлены с данными, полученными в ходе проведения предварительных испытаний портального тракторного путеукладчика ПБ-5. В ходе испытаний подача звеньев РШР (длиной 25 м) под путеукладчик осуществлялась на четырех путевых тележках ПТ-13. Испытания проводились в две смены каждая продолжительностью по 4 часа с часовым перерывом. В ходе проведения испытаний было произведена укладка 57 звеньев. За четырехчасовую смену было уложено: в 27 случаях – 4 звена, в 30 случаях – 5 звеньев РШР. Как видно из приведенных данных, полученный в ходе испытаний темп укладки РШР близок к расчетному, полученному в ходе численных экспериментов, что позволяет сделать вывод о достаточной адекватности описанных в статье моделей.

Заключение

Проведенные расчеты и численный эксперимент с имитационной моделью показали, что при дефиците исходных данных и сложности проведения натурного эксперимента с реальными объектами применение имита-

ционных моделей в транспортном строительстве позволяет рассчитать время выполнения технологических циклов, провести анализ загруженности отдельных производственных мощностей, математически обосновать оптимальное количество задействованных транспортировочных средств. Полученные результаты моделирования позволяют определить основные мероприятия, направленные на снижение времени простоя технических средств, задействованных на погрузочных и путеукладочных работах.

Предлагаемая имитационная модель позволяет обосновать отдельные параметры технологических процессов, выполняемых в ходе производства путеукладочных работ с использованием перспективных машин и механизмов на этапе их разработки. Таким образом, еще на этапе создания новых средств механизированной укладки могут формироваться обоснованные предложения по включению в состав подразделений технических средств, ориентированных на их транспортное обеспечение. Дальнейшее развитие модели позволит выполнить обоснование потребного состава команды, задействованной в производстве работ.

Список литературы

1. Рамеев О. А., Корнеенко В. П. Основы теории многокритериального оценивания объектов с многоуровневой структурой показателей эффективности. – М.: Макс Пресс, 2018. – 416 с. (Серия: Математические методы в аналитической деятельности).
2. Постановление Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 17.10.2000 № 76 «Об утверждении межотраслевых норм времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы» // Легалакт. URL: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-mintruda-rf-ot-17102000-n-76/> (дата обращения: 20.03.2023).
3. Алиев Т. И. Основы проектирования систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2015. – 120 с.
4. Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. Куликов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 560 с.
5. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
6. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – М.: Сов. радио, 1971. – 510 с.
7. Аблязов К. А., Козенкова Г. Л., Алимова Л. И. Управление операциями в портах с использованием системы массового обслуживания // Транспорт: наука, техника, управление. 2009. № 8. С. 46–49.
8. Лебедюк Э. А. Агентное моделирование: состояние и перспективы // Вестник Российской экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2017. № 6 (96). С. 155–162.
9. Wainer G. A. Discrete event modeling and simulation: A practitioner's approach. – CRC Press, 2009. – 486 p.

Сведения об авторах

Адволовкин Дмитрий Иванович, ORCID 0009-0007-3376-1454, канд. техн. наук, заместитель начальника Научно-исследовательского испытательного центра Железнодорожных войск Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия, Advolotkin1@mail.ru

Верстак Галина Алексеевна, ORCID 0009-0005-0781-5549, научный сотрудник, научно-исследовательский отдел, Научно-исследовательский испытательный центр Железнодорожных войск Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия, galinav224@PochtaO.ru

Статья поступила 15.10.2022, рассмотрена 14.11.2022, принята 21.01.2023

References

1. Rameev O. A., Korneenko V. P. The basics of the theory of multicriterion assessment of objects with multilevel structure of efficiency. Moscow, Maks Press Publ., 2018, 416 c. (Серия: *Matematicheskie metody v analiticheskoi deyatel'nosti*).
2. Decree of the Ministry of Labor and Social Development of the Russian Federation “On Approval of Intersectoral Time Standards for Loading and Unloading Wagons, Vehicles and Warehouse Operations” of October 17, 2000, no.76. Legalakt. Available at: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-mintruda-rf-ot-17102000-n-76/> (accessed 20.03.2023).
3. Aliyev T. I. *Osnovy proektirovaniya sistem* [Fundamentals of system design]. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO, 2015, 120 p.
4. *Gruzovye avtomobil'nye perevozki: uchebnike dlya vuzov* [Freight automobile transportation: textbook for universities]/A.V. Velmozhin, V.A. Gudkov, L.B. Mirotin, A.V. Kulikov. Moscow, *Goryachaya liniya – Telekom* Publ., 2006, 560 p.
5. Kleinrock L. *Vychislitel'nye sistemy s ocheredyami* [Computing systems with queues]. Moscow, Mir Publ., 1979, 600 p.
6. Saati T. L. *Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya* [Elements of queuing theory and its applications]. Moscow, Sov. radio Publ., 1971, 510 p.
7. Ablyazov K. A., Kozenkova G. L., Alimova L. I. *Upravlenie operatsiyami v portakh s ispol'zovaniem sistemy massovogo obsluzhivaniya* [Management of operations in ports using a queuing system]. Transport: nauka, tekhnika, upravlenie=Transport: Science, Technology, Management, 2009, no.8, pp.46–49.
8. Lebedyuk E. A. *Agentnoe modelirovanie: sostoyanie i perspektivy* [Agent-based modelling: state and prospects]. Vestnik Rossiiskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova=Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics, 2017, no.6(96), pp.155–162.
9. Wainer G. A. Discrete event modeling and simulation: A practitioner's approach. CRC Press, 2009, 486 p.

About the authors

Dmitriy I. Advolotkin, ORCID 0009-0007-3376-1454, Cand. Sc. (Eng.), Deputy Chief of Research and Testing Center of Railway Troops Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia, Advolotkin1@mail.ru
Galina A. Verstak, ORCID 0009-0005-0781-5549, Researcher, Research Department, Research and Testing Center of Railway Troops Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia, galinav224@PochtaO.ru

Received 15.10.2022, reviewed 14.11.2022, accepted 21.01.2023