

УДК 625.144.4

Моделирование логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ

Е. В. Пакулина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Пакулина Е. В. Моделирование логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 895–905. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-895-905

Аннотация

Цель: Рельсовые плети — один из наиболее важных ресурсов, используемых при проведении путевых работ. В связи с планируемым строительством высокоскоростной магистрали повышаются требования к организации поставок ресурсов, а особенно к срокам доставки. В настоящее время вопросы, связанные с логистикой рельсовых плетей, изучены мало. Целью настоящего исследования является оценка временных характеристик поставки рельсовых плетей и разработка предложений по сокращению продолжительности доставки плетей до потребителей. **Методы:** В качестве инструмента исследований выбран метод имитационного моделирования. **Результаты:** Выполнен анализ логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ, выявлены и проанализированы факторы, влияющие на продолжительность поставки. Построенная имитационная модель логистической цепи позволила определить, что существенным недостатком действующей системы поставки плетей для путевых работ является отсутствие склада. Для сокращения времени доставки и устранения задержек предложено ввести в систему дополнительный элемент — промежуточный склад-накопитель. **Практическая значимость:** Применение в логистической цепи склада-накопителя позволит сократить продолжительность доставки рельсовых плетей, уменьшить количество часов простоя рельсосварочного предприятия, а также снизить издержки, связанные с поставками рельсовых плетей.

Ключевые слова: Логистика, логистическая цепь, путевые работы, рельсовые плети, обеспечение ресурсами путевых работ, своевременность поставок, логистическая цепь поставки рельсовых плетей.

Введение

Прогресс в железнодорожной отрасли, проявляющийся в проектировании новых локомотивов, вагонов и систем управления, а также в их интеграции в существующую инфраструктуру, невозможен без широкого применения бесстыкового пути [1]. Отсутствие стыков при укладке пути позволяет уменьшить динамические нагрузки на рельсовые пути и колесные пары подвижного состава, обеспечить более плавный ход поездов, сократить расход металла на строительство и обслуживание, а также снизить эксплуатаци-

онные расходы. Вследствие чего в последние годы значительно возросли объемы капитальных ремонтов и работ по реконструкции пути с переходом на бесстыковой «бархатный путь».

В марте 2024 г. началось строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург, протяженность которой будет составлять 679 км [2]. Одним из важнейших ресурсов для строительства магистрали являются рельсовые плети, применяемые при укладке бесстыкового пути. Ввиду большой протяженности и масштабы строительства

потребуется большие объемы рельсовых плетей, применяемых при укладке бесстыкового пути, что однозначно приведет к значительному увеличению заказа и размера поставки.

В настоящее время готовые рельсовые плети доставляются напрямую от производителя — рельсосварочного предприятия (РСП) к исполнителям путевых работ — путевым машинным станциям (ПМС) в соответствии с предварительной заявкой. Логистическая цепь изготовления и поставки рельсовых плетей в места производства путевых работ состоит из следующих этапов: производство 100-метровых рельсов на металлургическом комбинате (МК); отгрузка и доставка сырья на РСП; прием и разгрузка сырья на предприятии; производство рельсовых плетей на РСП; отгрузка и доставка готовой продукции потребителям — ПМС. Схема логистической цепи изготовления и поставки рельсовых плетей представлена на рис. 1.

Основной задачей логистической цепи является обеспечение необходимого количества рельсовых плетей в точное время и в определенном месте. Логистическая цепь включает в себя несколько основных этапов, каждый из которых

имеет свое значение и влияет на общую эффективность процесса. При этом точное соблюдение сроков на каждом этапе логистической цепи критически важно для ее эффективной работы.

Для потребителя ключевым фактором в логистической цепи выступает продолжительность доставки T_d . Чем быстрее ПМС получает нужный ресурс, тем оперативнее может приступить к работе, и это влияет на своевременность выполнения путевых работ. Вопросы оценки продолжительности доставки и способы ее сокращения являются актуальными и значимыми. Таким образом, целью настоящего исследования является оценка временных характеристик поставки рельсовых плетей и разработка предложений по сокращению продолжительности доставки плетей до потребителей.

Продолжительность доставки является случайной величиной и зависит от многих факторов. Практика показывает, что вследствие различных обстоятельств, связанных с техническими неисправностями на железной дороге и организационными причинами, рельсовозные составы (РВС) для загрузки рельсовых плетей приходят в РСП с задержкой, которая может составлять от

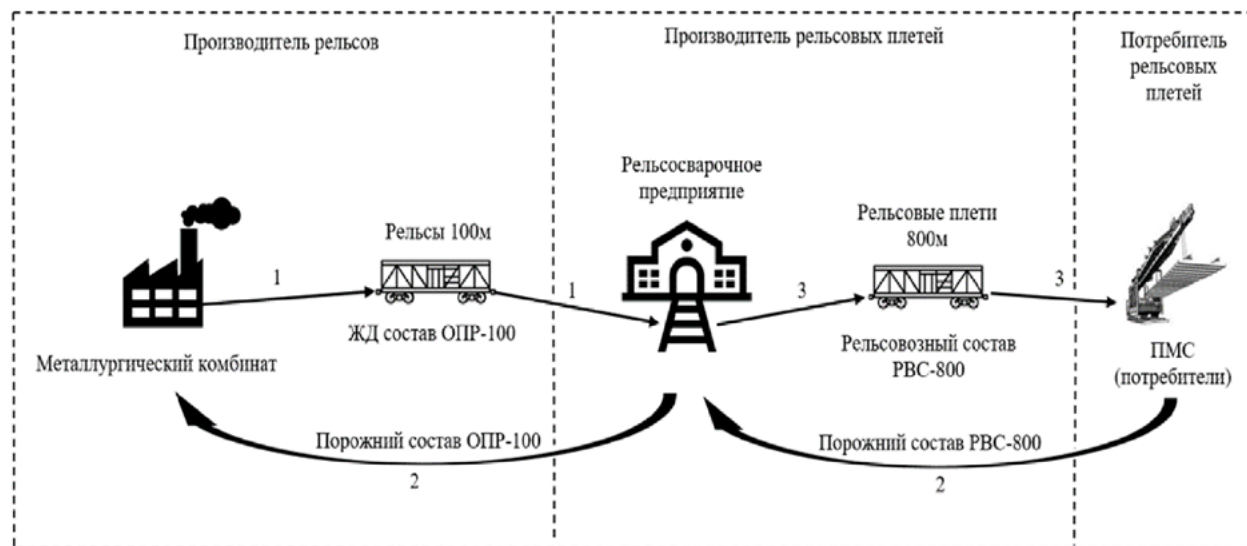


Рис. 1. Схема логистической цепи изготовления и поставки рельсовых плетей:

1 — доставка рельсов длиной 100 м; 2 — возврат подвижного состава;

3 — доставка готовых рельсовых плетей

нескольких дней до нескольких недель [3]. Например, на ведущем предприятии Октябрьской железной дороги РСП-1 основными причинами задержек поставки рельсовых плетей потребителю и простоев предприятия за последние несколько лет являлись нехватка РВС и несвоевременная поставка 100-метровых рельсов из МК (рис. 2).

Отсутствие возможности хранения готовых изделий вынуждает предприятие приостанавливать производство до момента прибытия РВС. Данные обстоятельства приводят к существенным издержкам изготовителей плетей и производителей путевых работ, препятствуют возможности производства плетей в соответствии с запланированным количеством.

Исполнители путевых работ сталкиваются с проблемой недопоставки ресурсов в установленные сроки, что отражается на сроках производства работ. Очевидно, что логистическую цепь поставки ресурсов для путевых работ необходимо исследовать и совершенствовать.

Вопросы оценки логистических цепей освещались в работах [4–8]. В исследованиях [4, 5] эффективность логистической цепи рассматривается как рациональное распределение участников по выполняемым функциям логистического процесса. Д. И. Афанасенко [6] предлагает рассматривать логистическую цепь как сеть взаимодей-

ствия множества партнеров, взаимосвязанных материальными и связанными с ними другими потоками. Оценка деятельности сети производится по критериям времени перемещения всех потоков в сети, затратам на выполнение отдельных логистических функций и качества логистического процесса в целом. В статье [7] используется понятие «логистический потенциал цепи поставок», с помощью которого оценивается своевременность, точность и качество продвижения материального потока. В исследовании [8] подход к эффективности логистической цепи включает формирование ее видимости и прослеживаемости посредством установления сотрудничества между участниками.

Для анализа и оценки логистических цепей преимущественно используют метод имитационного моделирования. Вопросы имитационного моделирования логистических цепей рассматривались в работах [9–12]. В работе [9] описаны механизмы сценарного моделирования цепочек поставок в рамках промышленного холдинга. Авторами исследования [10] предложена общая формализация модели ключевых задач для оценки и прогнозирования эффективности производственных и транспортно-логистических цепей в заданных условиях. В исследовании [11] формулируется подход к моделированию логи-

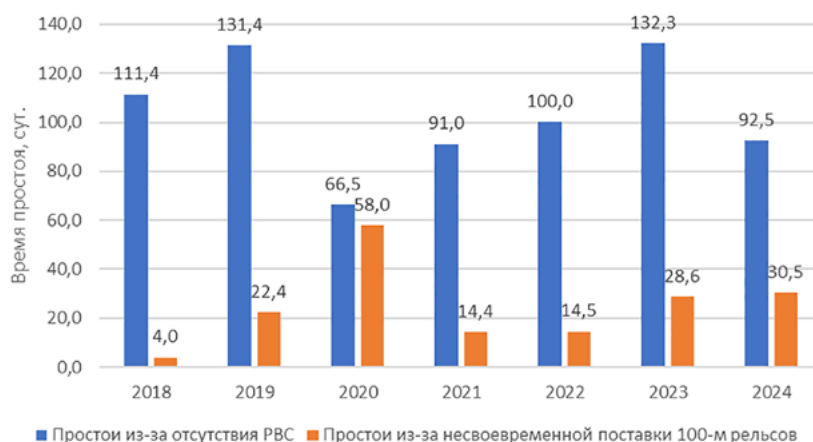


Рис. 2. Распределение простоев рельсосварочного предприятия РСП-1 по годам и причинам, сут. (по данным РСП-1 за 2018–2024 гг.)

стической цепи с объединением потоков и процессов в единую систему, который может быть использован для оценки эффективности существующих видов логистических цепей. Автор [12] предложил метод оптимизации логистических цепей поставок, основанный на агентном моделировании.

Представленные исследования посвящены анализу и построению моделей производственных логистических цепей, применимых к широкому спектру отраслей. Однако вопрос оценки продолжительности доставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ в известных источниках освещен слабо. Поэтому в данном исследовании предпринята попытка построить имитационную модель логистической цепи поставки рельсовых плетей для путевых работ, оценка которой будет производиться на основе одного из ключевых параметров логистической цепи — продолжительности доставки рельсовых плетей. Кроме того, модель позволяет оценить влияние дополнительного элемента в цепи — промежуточного склада на продолжительность доставки.

Методика моделирования логистической цепи поставки рельсовых плетей

Целью моделирования логистической цепи изготовления и поставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ является определение средней продолжительности доставки рельсовых плетей $\overline{T}_д$ от производителя — РСП до потребителей — ПМС.

Математическая модель задачи определения средней продолжительности доставки рельсовых плетей выглядит следующим образом:

$$\overline{T}_д = \overline{T}_{изг} + \overline{T}_{пер} + \overline{T}_{пр}, \quad (1)$$

где $\overline{T}_{изг}$ — средняя продолжительность изготовления рельсовых плетей, ч.,

$$\overline{T}_{изг} = \overline{T}_{компл} + \overline{T}_{всп}. \quad (2)$$

Здесь $\overline{T}_{компл}$ — средняя продолжительность комплектования рельсовой плети, ч.;

$\overline{T}_{всп}$ — средняя продолжительность вспомогательных работ, ч.

$\overline{T}_{пер}$ — средняя продолжительность движения РВС в пути, ч,

$$\overline{T}_{пер} = \overline{L} / \overline{V}_{уч}. \quad (3)$$

Здесь \overline{L} — среднее расстояние до ПМС, км;

$\overline{V}_{уч}$ — средняя участковая скорость движения состава, км/ч.

$\overline{T}_{пр}$ — средняя продолжительность погрузо-разгрузочных операций, ч,

$$\overline{T}_{пр} = \overline{T}_{выгр} + \overline{T}_{погр} + \overline{T}_{разг}. \quad (4)$$

Здесь $\overline{T}_{выгр}$ — средняя продолжительность разгрузки сырья в РСП, ч;

$\overline{T}_{погр}$ — средняя продолжительность погрузки рельсовых плетей на РВС, ч;

$\overline{T}_{разг}$ — средняя продолжительность разгрузки рельсовых плетей в ПМС, ч.

Анализ зависимостей (1)–(4) показывает, что решение задачи определения средней продолжительности доставки рельсовых плетей в аналитическом виде представляет сложность ввиду большого количества факторов, влияющих на конечный показатель. Поэтому удобно определять значение показателя путем моделирования.

Имитационное моделирование — метод исследования системы с помощью замены реальной системы на компьютерную модель и дальнейшего проведения экспериментов над моделью системы. Модель представляет собой логические связи и функциональные отношения, описывающие логику работы элементов исследуемой системы [13]. Она позволяет исследовать параметры изучаемого предмета с учетом меняющихся параметров и величин в зависимости от времени, которые влияют на показатели взаимодействия элементов системы.

В настоящее время при разработке имитационных моделей используют три основных подхода:

дискретно-событийное (процессное) моделирование, системную динамику и агентное моделирование. В дискретно-событийном моделировании функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий. Событие происходит в определенный момент времени и знаменует собой изменение состояния системы. Системная динамика — направление в изучении сложных систем, исследующее их поведение во времени и в зависимости от структуры элементов системы и взаимодействия между ними. Системно-динамические модели состоят из петель обратной связи, которые формируют поведение системы. Агентная модель представляет реальный мир в виде многих отдельно специфицируемых активных подсистем, называемых агентами. Каждый из агентов взаимодействует с другими агентами, которые образуют для него внешнюю среду, и в процессе функционирования может изменить как внешнюю среду, так и свое поведение [14]. Все перечисленные методы применимы для моделирования цепей поставок, выбор конкретного подхода зависит от целей проектирования модели.

В качестве средств для имитационного моделирования можно использовать различные программные средства, например Arena, Simulink, Actor Pilgrim, GPSS, AnyLogic, iWebsim, Simcad Pro, SimEvents и др. [14, 15]. Существующие средства имитации в основном предоставляют возможность моделирования узконаправленных систем.

Для решения поставленной задачи была использована система AnyLogic. В отличие от остальных программных средств, AnyLogic позволяет решать широкий круг задач за счет объединения в своей библиотеке различных подходов и конкретных отраслей для моделирования. Это позволяет моделировать транспортные потоки с использованием специализированных библиотек, включающих в том числе блоки железнодорожных составов и специализированных агентов, связанных с железнодорожным

транспортом. Поэтому модель логистической цепи поставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ была выполнена в программе AnyLogic, версия 8.9.6.

Исходными данными для моделирования являются: количество рельсов, произведенных МК, шт.; объемы рельсов, отгруженных в РСП, шт.; количество рельсовых плетей, произведенных РСП, шт.; количество отгруженных в ПМС рельсовых плетей, шт.; расстояние от РСП до ПМС, км; средняя участковая скорость рельсовозных составов, км/ч. Исходные данные были получены от Рельсосварочного предприятия № 1 Октябрьской железной дороги и дирекции по ремонту пути «Путьрем».

В структуре модели предусмотрены следующие типы потоков: производственный (рельсы и рельсовые плети) и транспортный, предназначенные для перемещения сырья и готовой продукции. Выпуск рельсовых плетей моделировался блоком типа *Source*, потребление очередной рельсовой плети — блоком *Sink*. Составы для транспортировки рельсов и рельсовозные составы, которые являются ресурсами одного типа, моделировались блоками *trainSource*. Потоки были замкнуты для моделирования перемещения составов в пункт назначения и обратно. Процесс погрузки рельсов и рельсовых плетей моделировался блоком *Pickup*, процесс разгрузки — блоком *Dropoff*. Схема имитационной модели показана на рис. 3. В табл. 1 приведены параметры и их значения, использованные при моделировании.

Для оценки продолжительности доставки рельсовых плетей до потребителей в модель были добавлены блоки для измерения времени *DostStart* и *DostFin1*, *DostFin2*, *DostFin3*.

Продолжительность моделирования — 1 год, шаг моделирования — 1 месяц. Выбор шага моделирования был обусловлен особенностями предоставленных исходных данных, время выполнения одиночной операции исчислялось в часах.

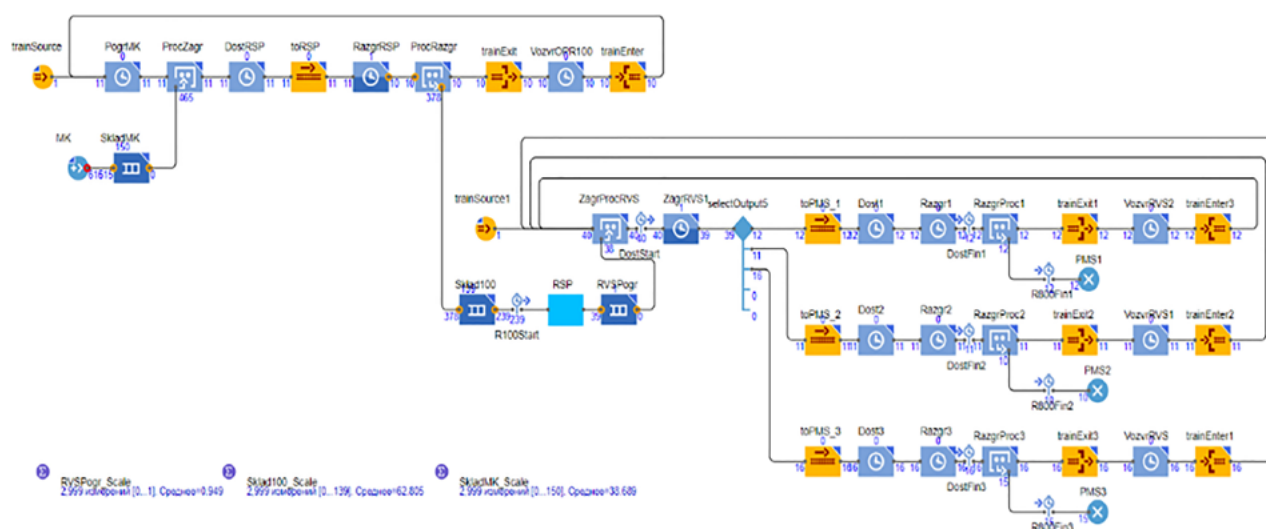


Рис. 3. Схема имитационной модели логистической цепи поставки рельсовых плетей

Таблица 1. Список параметров и их значений, использованных в модели

№ п/п	Имя элемента	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	MK	Количество произведенных рельсов	2100	шт/месяц
2	DostRSP	Продолжительность доставки рельсов в PCП	98,4	ч
3	RSP	Время производства рельсовой плиты на PCП	7,5	ч
4	ZagrRVS 1,2,3	Время загрузки рельсовых плетей на PBC	Сценарий № 1 — 13,3 Сценарий № 2 — 10	ч
5	Dost 1,2,3	Время доставки рельсовых плетей до ПМС	интервал 2,85–13,88	ч
6	Razgr 1,2,3	Время разгрузки рельсовых плетей в ПМС	интервал 29,5–82	ч

Моделирование логистической цепи обеспечения путевых работ выполнялось при двух сценариях:

Сценарий № 1: моделируется поставка плетей при условиях существующей логистической цепи. При исполнении данного сценария происходит накопление рельсовых плетей в одном из накопительных блоков, которое может привести к остановке модели.

Сценарий № 2: моделируется поставка плетей, при этом в модель добавляется промежуточный склад рельсовых плетей. Модель была дополнена блоком-накопителем *Sklad800* (рис. 4). Предварительно была установлена емкость склада рельсовых плетей в размере 100 единиц, что было сделано для последующей оценки реальной потребности в складских мощ-

ностях и их вместимости. В данном сценарии рельсовые плиты находятся на промежуточном складе на момент подачи PBC для загрузки. Это позволяет снизить влияние колебаний процесса изготовления рельсовых плетей на продолжительность доставки.

Результаты моделирования и обсуждение

По результатам имитационного моделирования была определена средняя продолжительность доставки рельсовых плетей до ПМС по сценарию № 1 и сценарию № 2.

В результате моделирования логистической цепи по двум сценариям были построены графики фактической продолжительности доставки рельсовых плетей от PCП до ПМС (рис. 5) и гистограммы распределения вероятностей про-

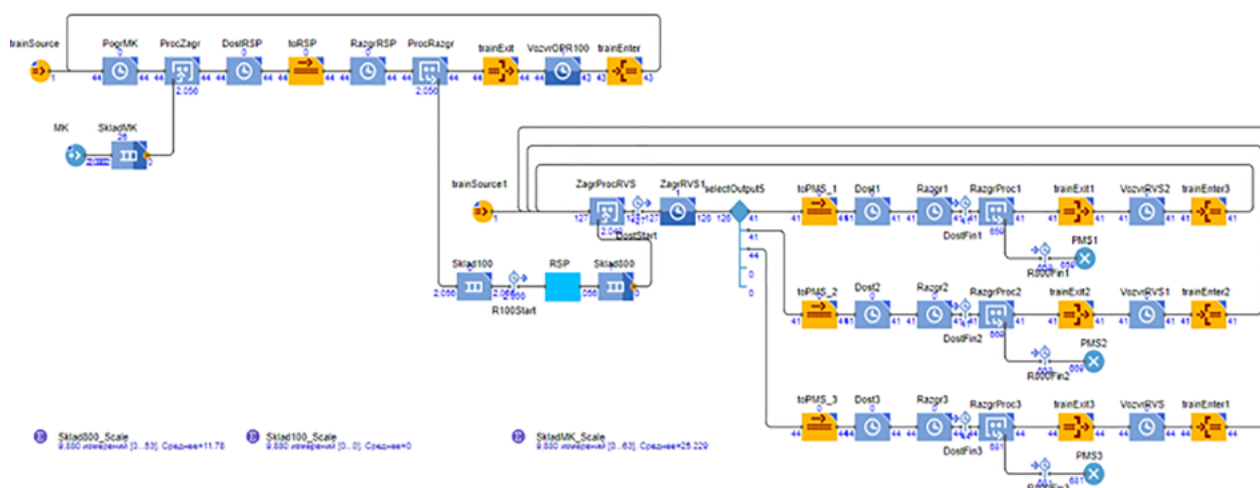


Рис. 4. Схема имитационной модели логистической цепи с промежуточным складом-накопителем рельсовых плетей

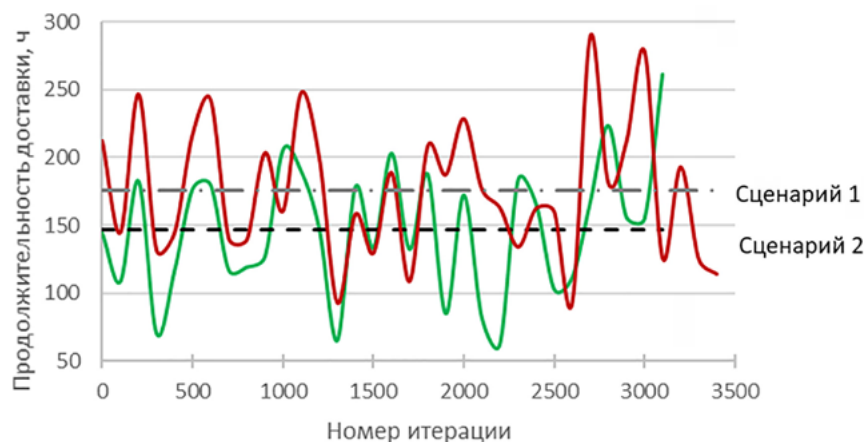


Рис. 5. График фактической продолжительности доставки рельсовых плетей от РСП до ПМС, включающий время производства, загрузки и разгрузки

должительности перемещения РВС от РСП до ПМС (рис. 6).

Согласно рис. 5, среднее значение продолжительности доставки рельсовых плетей от РСП до ПМС, включающее время производства, загрузки и разгрузки плетей, по сценарию № 1 составляет 175,45 ч, а по сценарию 2 — 147,27 ч. Таким образом, наличие склада уменьшает продолжительность доставки от РСП до ПМС на 16 %, что позволяет произвести и доставить больший объем рельсовых плетей.

Сравнение средней продолжительности доставки рельсовых плетей (рис. 6) показало, что

при наличии промежуточного склада-накопителя продолжительность общего цикла доставки от МК до ПМС сокращается на 10 % (табл. 2).

Одним из факторов, влияющих на продолжительность доставки, является дальность перевозки рельсовых плетей. Вопрос влияния продолжительности доставки и средней участковой скорости потребует дополнительных исследований.

Заключение

В рамках настоящего исследования был выполнен анализ логистической цепи поставки рельсовых плетей для обеспечения путевых работ. При-

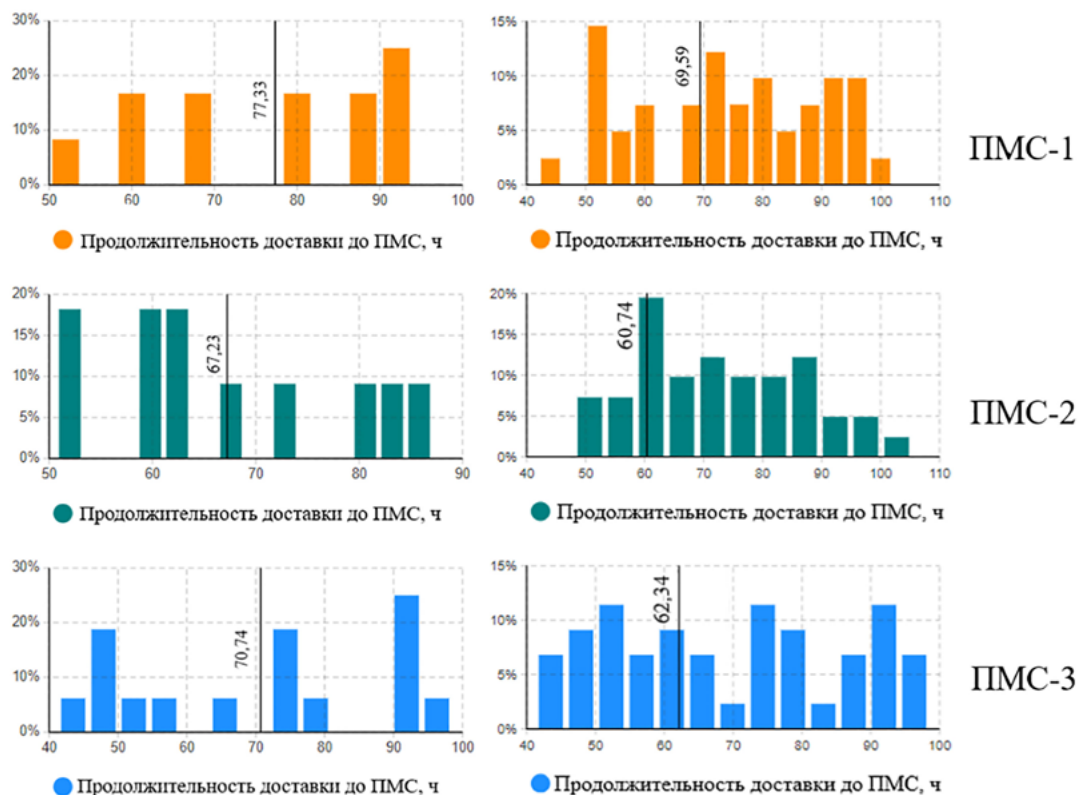


Рис. 6. Распределение вероятностей продолжительности перемещения РВС от РСР до ПМС:
а — сценарий № 1; *б* — сценарий № 2

Таблица 2. Средняя продолжительность доставки рельсовых плетей от РСР до ПМС

Потребители	Средняя продолжительность доставки до ПМС без промежуточного склада, ч	Средняя продолжительность доставки до ПМС с промежуточным складом, ч
ПМС-1	77,33	69,59
ПМС-2	67,22	60,74
ПМС-3	70,74	62,34
Среднее по сценарию, ч	71,76	64,22

менение системы имитационного моделирования показало, что действующая в настоящее время цепь поставки рельсовых плетей имеет существенные недостатки в виде задержек доставки рельсовых плетей в места путевых работ. Для сокращения времени доставки и устранения задержек было предложено введение в систему дополнительного элемента — промежуточного склада-накопителя, наличие которого позволяет уменьшить продолжительность доставки рельсовых плетей от РСР до ПМС на 16 %, продолжительность общего цикла

доставки от МК до ПМС сокращается на 10 %. Применение модели логистической цепи поставки рельсовых плетей в места путевых работ с промежуточным складом позволит сократить издержки производителей и потребителей, а также время на производство путевых работ.

В связи с возможным изменением технологии изготовления 800-метровых плетей и применением мобильного рельсосварочного комплекса для сварки плетей в пути (до 1600 м) может потребоваться дополнительное исследование

логистических цепей поставки материалов для путевых работ.

Список источников

1. Железная дорога без стыков: все о бесстыковом пути. — URL: <https://www.zaportal.ru/articles/zheleznaya-doroga-bez-stykov> (дата обращения: 20.08.2025).

2. Высокоскоростная магистраль «Две столицы». Проект Президента РФ. — URL: <https://vsm2stl.ru/#train> (дата обращения: 20.08.2025).

3. Малахова Т. А. Анализ причин задержек грузовых поездов на участках железной дороги / Т. А. Малахова // Наука, техника и образование. — 2017. — № 10(40). — С. 34–36.

4. Игонина А. Е. Оценка эффективности логистической цепи / А. Е. Игонина // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2008. — № 1(41). — С. 72–74.

5. Ларин О. Н. О способах оценки работы цепей поставок / О. Н. Ларин // Транспорт и логистика устойчивого развития территорий, бизнеса, государства (драйверы роста, тренды и барьеры): материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 21 ноября 2020 года / Государственный университет управления. — М.: ГУУ, 2025. — С. 188–191.

6. Афанасенко Д. И. Управление логистической цепью как сетью / Д. И. Афанасенко // Вестник Томского государственного университета. — 2009. — № 319. — С. 135–137.

7. Полещук И. И. Логистический потенциал цепи поставок: понятие и показатели оценки / И. И. Полещук, О. С. Гулягина // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D: Экономические и юридические науки. — 2014. — № 14. — С. 141–145.

8. Куликова О. М. Проектирование эффективной логистической цепочки поставок / О. М. Куликова, С. Д. Суворова // Региональные проблемы преобразования экономики. — 2021. — № 4(126). — С. 122–129.

9. Максимов А. М. Сценарное моделирование цепочек поставок в транспортно-логистической системе про-

мышленного холдинга / А. М. Максимов, К. Ж. Кудайберген // Недропользование и транспортные системы. — 2022. — Т. 12. — № 2. — С. 25–37.

10. Жуков А. О. Разработка модели ключевых задач для оценки и прогнозирования эффективности производственных и транспортно-логистических цепочек в заданных условиях / А. О. Жуков, У. А. Пестун, Ю. А. Давидович // Стратегическое планирование и развитие предприятий: материалы XXI Всероссийского симпозиума, Москва, 10–11 ноября 2020 года / Центральный экономико-математический институт РАН. — М.: ЦЭМИ РАН, 2020. — С. 680–681.

11. Демченко А. И. Процессно-ориентированные подходы к проектированию и моделированию логистических цепей / А. И. Демченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. — 2014. — Т. 8. — № 4. — С. 169–178.

12. Жук М. А. Моделирование системы поддержки оптимизации логистических цепочек поставок / М. А. Жук, И. А. Цыганова // Инновации и инвестиции. — 2016. — № 12. — С. 104–108.

13. Кораблев Ю. А. Имитационное моделирование: учебник / Ю. А. Кораблев. — М.: КНОРУС, 2017. — С. 10–11.

14. Белов А. Г. Методы имитационного моделирования / А. Г. Белов, С. А. Моисеев, А. В. Григорьев // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2014. — Т. 1. — С. 277–279.

15. Малыгина С. Н. Обзор современных средств имитационного моделирования / С. Н. Малыгина, Е. О. Неупокоева // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. — 2022. — Т. 13. — № 2. — С. 134–143.

Дата поступления: 20.10.2025

Решение о публикации: 19.11.2025

Контактная информация:

ПАКУЛИНА Елена Вячеславовна — ст. преподаватель;
elena_pakulina29@mail.ru

Modelling a Rail Supply Chain for Railway Track Maintenance

E. V. Pakulina

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Pakulina E. V. Modelling a Rail Supply Chain for Railway Track Maintenance // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 895–905. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-895-905

Summary

Purpose: Welded rails represent a critical element in the maintenance of a railway track. In the context of high-speed railway construction, the demand for efficient resource supply management, particularly concerning delivery timelines, is becoming increasingly stringent. However, existing research has inadequately addressed the logistical challenges associated with rail delivery. This study aims to assess the time-related aspects of welded rail deliveries and to propose strategies for minimizing the delivery time to end users. **Methods:** Simulation modelling has been employed as the research tool. **Results:** The analysis of the logistics chain for welded rail delivery for track maintenance has revealed various factors affecting the rail delivery timelines. The simulation model of the logistics chain has highlighted that a primary issue within the current rail delivery system for track maintenance is the insufficient availability of storage facilities. To minimize delivery times and eradicate delays, the proposal involves the integration of an intermediate storage warehouse into the system. **Practical significance:** The use of an intermediate storage warehouse will reduce the rail delivery time, decrease the downtime of the rail welding facility, and reduce the costs related to the supply of welded rails.

Keywords: Logistics, logistics chain, track maintenance work, welded rail lengths, resource logistics for track work, delivery timelines, logistics of welded rail supply chain.

References

1. *Zheleznaya doroga bez stykov: vse o besstykovom puti* [Railroad without joints: all about continuous welded rail]. Available at: <https://www.zaoportal.ru/articles/zheleznaya-doroga-bez-stykov> (accessed: August 20, 2025). (In Russian)
2. *Vysokoskorostnaya magistral' "Dve stolitsy". Proekt Prezidenta RF* [High-speed railway "Two capitals". Project of the President of the Russian Federation]. Available at: <https://vsm2stl.ru/#train> (accessed: August 20, 2025). (In Russian)
3. Malakhova T. A. Analiz prichin zaderzhek gruzovykh poezdov na uchastkakh zheleznoy dorogi [Analysis of the causes of freight train delays on railway sections]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2017, Iss. 10(40), pp. 34–36. (In Russian)
4. Igonina A. E. Otsenka effektivnosti logisticheskoy tsepi [Evaluation of logistics chain efficiency]. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2008, Iss. 1(41), pp. 72–74. (In Russian)
5. Larin O. N. O sposobakh otsenki raboty tsepey postavok [On methods for assessing the performance of supply chains]. *Transport i logistika ustoychivogo razvitiya territoriy, biznesa, gosudarstva (drayvery rosta, trendy i bar'ery): materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 21 noyabrya 2024 goda* [Transport and logistics of sustainable development of territories, business, state (growth drivers, trends and barriers): proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 21, 2024]. Moscow: GUU Publ., 2025, pp. 188–191. (In Russian)

6. Afanasenko D. I. Upravlenie logisticheskoy tsep'yu kak set'yu [Managing the logistics chain as a network]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University]. 2009, Iss. 319, pp. 135–137. (In Russian)
7. Poleshchuk I. I., Gulyagina O. S. Logisticheskii potentsial tsepi postavok: ponyatie i pokazateli otsenki [Logistics potential of the supply chain: concept and assessment indicators]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D: Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series D: Economic and legal sciences]. 2014, Iss. 14, pp. 141–145. (In Russian)
8. Kulikova O. M., Suvorova S. D. Proektirovanie effektivnoy logisticheskoy tsepochnki postavok [Designing an efficient logistics supply chain]. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki* [Regional problems of economic transformation]. 2021, Iss. 4(126), pp. 122–129. (In Russian)
9. Maksimov A. M., Kudaybergen K. Zh. Stsenarnoe modelirovanie tsepochek postavok v transportno-logisticheskoy sisteme promyshlennogo kholdinga [Scenario modeling of supply chains in the transport and logistics system of an industrial holding]. *Nedropol'zovanie i transportnye sistemy* [Subsoil use and transport systems]. 2022, vol. 12, Iss. 2, pp. 25–37. (In Russian)
10. Zhukov A. O., Pestun U. A., Davidovich Yu. A. Razrabotka modeli klyuchevykh zadach dlya otsenki i prognozirovaniya effektivnosti proizvodstvennykh i transportno-logisticheskikh tsepochek v zadannykh usloviyakh [Development of a model of key tasks for assessing and predicting the efficiency of production and transport and logistics chains under given conditions]. *Strategicheskoe planirovanie i razvitie predpriyatiy: materialy XXI Vserossiyskogo simpoziuma, Moskva, 10–11 noyabrya 2020 goda* [Strategic planning and enterprise development: proceedings of the XXI All-Russian Symposium, Moscow, November 10–11, 2020]. Moscow: TsEMI RAN Publ., 2020, pp. 680–681. (In Russian)
11. Demchenko A. I. Protsessno-orientirovannye podkhody k proektirovaniyu i modelirovaniyu logisticheskikh tsepey [Process-oriented approaches to designing and modeling logistics chains]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i menedzhment* [Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and management]. 2014, vol. 8, Iss. 4, pp. 169–178. (In Russian)
12. Zhuk M. A., Tsyganova I. A. Modelirovanie sistemy podderzhki optimizatsii logisticheskikh tsepochek postavok [Modeling a support system for optimizing logistics supply chains]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments]. 2016, Iss. 12, pp. 104–108. (In Russian)
13. Korablev Yu. A. *Imitatsionnoe modelirovanie: uchebnik* [Simulation modeling: textbook]. Moscow: KNORUS Publ., 2017, pp. 10–11. (In Russian)
14. Belov A. G., Moiseev S. A., Grigor'ev A. V. Metody imitatsionnogo modelirovaniya [Methods of simulation modeling]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. 2014, vol. 1, pp. 277–279. (In Russian)
15. Malygina S. N., Neupokoeva E. O. Obzor sovremennykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya [Review of modern simulation tools]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the RAS. Series: Technical sciences]. 2022, vol. 13, Iss. 2, pp. 134–143. (In Russian)

Received: October 20, 2025

Accepted: November 19, 2025

Author's information:

Elena V. PAKULINA — Senior Lecturer;
elena_pakulina29@mail.ru