

А. А. Лохматов

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА РАЗМЕЩЕНИЯ РЕМОНТНЫХ УЧАСТКОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА:
МУЛЬТИПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ
ЗАДАЧЕ О ПОТОКЕ МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ**

Аннотация. Рассматривается задача размещения, специализации и развития сети ремонтных участков специального самоходного подвижного состава как пространственно-распределённого комплекса инфраструктуры железнодорожного транспорта. Обоснована актуальность поставленной задачи. Предложена формальная постановка задачи размещения в мультипериодической форме, отличающаяся одновременным учётом бинарного фильтра допусков, порога рентабельности загрузки производственного участка и явной оси периодов планирования, что позволяет описать сезонную неравномерность ремонтной кампании. Доказана эквивалентность данной задачи (при освобождении от бинарных переменных активации) задаче о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети, включение переменных активации и порога рентабельности переводит её к задаче о потоке с фиксированной стоимостью объекта. Операционно-тактический уровень (целочисленное линейное программирование) дополнен стратегическим уровнем многокритериального выбора сценария развития сети методами анализа иерархий и упорядочения по близости к идеальному решению с робастной оценкой по диапазону программы путевых работ. Аппарат апробирован в условиях Восточного полигона ОАО «РЖД». Устойчивым результатом является адресный приоритет развития восточной части сети.

Ключевые слова: размещение ремонтных участков, специальный самоходный подвижной состав, задача размещения с ограничением мощности, мультипериодическая постановка, поток минимальной стоимости, расширенная во времени сеть, метод анализа иерархий, метод TOPSIS, Восточный полигон.

Для цитирования: Лохматов, А. А. Многокритериальная задача размещения ремонтных участков специального самоходного подвижного состава: мультипериодическая постановка и эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости / А. А. Лохматов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 21–29. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_21.

Введение

Эффективность системы ремонта на железнодорожном транспорте во многом зависит от рационального размещения ремонтных мощностей, оптимального распределения функций между ремонтными предприятиями и правильной организации логистических цепочек. Неоптимальная конфигурация ремонтной сети приводит к ухудшению показателей работы железнодорожного комплекса в целом, поскольку в таком случае могут возрастать транспортные и эксплуатационные затраты, увеличиваться время простоя ремонтной техники, снижаться уровень технической готовности подвижного состава. В условиях ограниченности финансовых и производственных ресурсов особую значимость приобретает поиск таких вариантов конфигурации ремонтной сети, которые обеспечивают минимизацию совокупных затрат на техническое обслуживание и ремонт при сохранении требуемого уровня надежности и доступности ремонтных услуг. Необходимость адаптации ремонтной инфраструктуры к реальным объемам работ, развитию технологий диагностики и ремонта, а также к территориальным особенностям эксплуатации специального самоходного подвижного состава (СПС) диктует необходимость применения современных методов оптимизации и моделирования. Таким образом, разработка научно обоснованных подходов к определению оптимальной конфигурации ремонтной сети СПС является весьма актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность использования техники, сократить эксплуатационные расходы, повысить доступность ремонтных услуг, сократить сроки восстановления техники после отказов и плановых ремонтов, улучшить использование производственных ресурсов и обеспечить устойчивое функционирование железнодорожной инфраструктуры в целом.

Ремонтная сеть СПС представляет собой совокупность производственных площадок (базовых предприятий и участков служб механизации, а также ремонтных участков сетевого подрядчика), обслуживаемого парка и связывающих их транспортных плеч, являясь, таким образом, пространственно-распределённым комплексом инфраструктуры. Конфигурация ремонтной сети зависит от того, какие площадки задействованы для ремонта, на каких видах ремонта и сериях машин они специализированы, как распределён парк ремонтных площадок и других факторов, и определяет эксплуатационные и экономические показатели системы. Задачей данного исследования является обоснованный выбор этой конфигурации – оптимального размещения и специализации объектов инфраструктуры.

Потребность в строгой постановке задачи обусловлена двумя обстоятельствами: 1) на ранних этапах конфигурация ремонтной сети описывалась содержательно, и результат получался сравнением заранее заданных вариантов, что не приводило к целевому результату; 2) необходимо учитывать, что задача является многокритериальной, при этом критерии – сокращение плеч доставки, минимизация приведённых затрат, снижение потерь перевозочного процесса по сути являются частично конфликтующими целями.

Теория размещения объектов восходит к задаче о медиане графа [1] и развита в классических постановках p -медианной задачи, задачи о покрытии множества и задачи размещения с ограничением мощности [2–6]. Применительно к железнодорожной инфраструктуре известны постановки задачи о размещении депо технического обслуживания в городских сетях [7] и задачи выбора места обслуживания подвижного состава [8]. Аппарат сетевых потоков, в том числе задача о потоке минимальной стоимости, начал свое развитие с работ Л. Р. Форда и Д. Р. Фалкерсона [9]. Многокритериальный выбор опирается на метод анализа иерархий [10] и метод упорядочения по близости к идеальному решению [11].

Научная новизна настоящей работы состоит в формальной постановке задачи о размещении именно для ремонтной сети СПС, отличающейся от известных постановок тремя элементами в их совокупности:

- 1) бинарным фильтром допусков, отражающим аттестацию площадки на серию и вид ремонта;
- 2) порогом рентабельности загрузки производственного участка;
- 3) явной осью периодов планирования, описывающей сезонную неравномерность ремонтной кампании.

В данной работе показана эквивалентность постановки задачи о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети, и установлена связка операционного уровня со стратегическим уровнем многокритериального выбора. Объектом исследования является ремонтная сеть СПС.

1 Формальная постановка задачи размещения

Множества, используемые в модели

В нашей постановке задачи будут использованы следующие обозначения множеств.

Пусть I – множество точек спроса; точка спроса – это группа транспортов СПС, однородная по пункту дислокации, виду требуемого ремонта (ТР-1, ТР-2, КР) * и транспортной скорости класса машины. Далее обозначим:

J – множество площадок-кандидатов с известными координатами станции базирования;

$T = \{1, 2, \dots, M\}$ – множество периодов планирования (в базовом расчёте $M = 12$ месяцев годового горизонта);

$J_i \subseteq J$ – подмножество площадок, допущенных к обслуживанию группы i (ограничение допусков);

$T_i \subseteq T$ – допустимое временное окно обслуживания заявки i (в базовой настройке – единственный период возникновения заявки по графику планово-предупредительного ремонта. При включении сглаживания сезонной загрузки окно расширяется на допустимое опережение и запаздывание норматива.

Параметры модели

Определим основные параметры модели следующим образом:

n_i – число транспортов (заявок) в группе i ;

* ТР-1, ТР-2 и КР – регламентированные планово-предупредительные виды технического обслуживания и ремонта самоходного железнодорожного подвижного состава. ТР-1 – текущий ремонт первого объема, выполняется в депо приписки техники; ТР-2 – текущий ремонт второго объема, проводится в специализированных депо; КР – капитальный ремонт, выполняется на специализированных заводах.

d_i – длительность одного ремонта группы i в позиция-днях (для каждого из видов ремонта приняты значения порядка: 18 дней – для ТР-1, 30 дней – для ТР-2, 42 дня – для КР);

c_{ij} – приведённые транспортные потери (измеряемые в руб./год, не зависят от периода) от обслуживания одного транспорта группы i на площадке j ;

F – годовые условно-постоянные затраты на содержание одного активного ремонтного участка, руб./год;

Q_j^t – ёмкость площадки j в периоде t , позиция – дни (пропорциональна календарной длине периода и числу ремонтных позиций);

$\rho \in [0,1]$ – порог рентабельности, доля годовой ёмкости.

Транспортные потери рассчитываются через технологические соотношения. Число снятых ниток грузового движения на одно плечо L_{ij} (L_{ij} – длина плеча перевозки):

$$N_{ij} = 1 + \max \left(0, \frac{L_{ij} (1/v_{tr} - 1/v_{gr})}{\tau} \right), \quad (1)$$

где v_{tr} , v_{gr} – транспортная скорость пересылаемой машины и ходовая скорость грузового поезда соответственно, τ – межпоездной интервал графика. Формула (1) отражает дополнительное занятие пропускной способности инфраструктуры при следовании транспортируемой машины со скоростью, отличной от скорости грузопотока.

Приведённые транспортные потери определяются формулой:

$$c_{ij} = \left(\frac{2L_{ij}}{v_{per}} \right) s_{prst} + N_{ij} s_{nit}, \quad (2)$$

где первое слагаемое – стоимость простоя машины в процессе пересылки (в прямом и обратном направлениях) при скорости пересылки v_{per} и стоимости машино-суток простоя s_{prst} ; второе слагаемое отражает стоимость потерь перевозочного процесса, связанные со снятием ниток движения поездов при стоимости снятия одной нитки s_{nit} . Целевая функция наследует причинно-следственную цепочку технологии: размещение $\rightarrow$ плечо $\rightarrow$ простой и нитки $\rightarrow$ затраты.

Переменные величины

Поскольку мы используем бинарную фильтрацию допусков площадок, введем следующее обозначение: $y_j \in \{0,1\}$ – булева переменная активации, принимающая значение 1, если площадка j задействована как активный ремонтный участок на протяжении всего планового горизонта, и 0 – в противном случае.

Обозначим также переменную $x_{ij}^t \in [0,1]$, которая является непрерывной величиной и отражает долю спроса группы i , обслуженной на площадке j в периоде t .

Или в более строгой математической нотации можем записать:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если площадка } j \text{ открыта и используется, как ремонтный участок,} \\ 0 & \text{– иначе.} \end{cases}$$

$x_{ij}^t \in [0,1]$, $\forall i \in I, j \in J, t \in T$, где x_{ij}^t определяет долю потребности группы i , закрепленную за площадкой j в период t .

Целевая функция и ограничения задачи

Задача размещения ремонтных мощностей в мультипериодической постановке является задачей смешанного целочисленного линейного программирования поиска минимума функции:

$$\min_{x,y} Z = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} n_i c_{ij} x_{ij}^t + F \sum_{j \in J} y_j, \quad (3)$$

где первое слагаемое целевой функции описывает совокупные транспортные потери, а второе – фиксированные затраты на содержание ремонтных площадок, при следующих ограничениях, обозначенных формулами (4)–(8).

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} x_{ij}^t = 1, \quad \forall i \in I. \quad (4)$$

Выполнение ограничения (4) обеспечивает полное распределение спроса каждой группы техники между допустимыми площадками и периодами обслуживания.

Ограничение объема работ на площадке с ее доступной производственной мощностью в каждом периоде определяется соотношением:

$$\sum_{i \in I} n_i d_i x_{ij}^t \leq Q_j^t y_j, \quad \forall j \in J, t \in T. \quad (5)$$

Минимальный уровень загрузки активированной площадки должен отвечать условию:

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} n_i d_i x_{ij}^t \geq \rho \left(\sum_{t \in T} Q_j^t \right) y_j, \quad \forall j \in J. \quad (6)$$

Исключение назначения работ на недопустимые площадки или в недопустимые периоды определяется ограничением:

$$x_{ij}^t = 0, \quad \forall i \in I, j \notin J_i, \text{ или } t \notin T_i. \quad (7)$$

Также следует учитывать естественные ограничения, следующие из постановки задачи:

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J; \quad x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T. \quad (8)$$

Целевая функция (3) суммирует приведённые транспортные потери по всем обслуживаемым заявкам и периодам и условно-постоянные годовые затраты на содержание задействованных площадок, согласуя технологический критерий (через c_{ij}) и экономический (через F). Ограничение (4) требует полного обслуживания каждой заявки в пределах её окна T_i . Ограничение (5) определяет ёмкость работ в каждом периоде. Ограничение (6) означает порог рентабельности, заданный суммарно по горизонту планирования (участок может быть мало загружен летом и насыщен в зимний период; рентабельность естественно оценивать на годовом горизонте). Условие (7) реализует фильтры допусков и допустимых периодов. При вырождении горизонта к единственному периоду ($|T|=1$) постановка задачи переходит в классическую стационарную задачу размещения с ограничением мощности – одно-периодное приближение.

2 Эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети

Если временно исключить из выражений (3) и (8) бинарные переменные активации y_j и ограничение рентабельности (6), оставшаяся постановка переписывается как задача о потоке минимальной стоимости на сети, развёрнутой по оси времени. Класс таких задач и алгоритмы их решения заложены Л. Р. Фордом и Д. Р. Фалкерсоном в работе [9].

Для разработки сетевой модели построим ориентированный граф (рис. 1). Каждому требованию группы техники $i \in I$, подлежащему обслуживанию в периоде $t \in T_i$, соответствует узел (i, t) , каждой ремонтной площадке $j \in J$ в периоде $t \in T$ – узел (j, t) . Кроме того, вводятся служебные вершины: источник S и сток σ . Дуга $(i, t) \rightarrow (j, t)$, отражающая возможность обслуживания группы i на площадке j проводится только для допустимой пары $(j \in J_i, t \in T_i)$. Стоимость единицы потока на данной дуге принимается равной $n_i c_{ij}$, а ее пропускная способность определяется величиной ремонтной трудоемкости $n_i d_i$. Для ограничения производственной мощности каждой площадки вводятся дуги $(i, t) \rightarrow \sigma$, имеющие пропускную способность (ёмкость) Q_j^t . Дуги из источника S проводятся к узлам

спроса (i, t) . Переменная назначения x_{ij}^t играет роль потока по дуге обслуживания $(i, t) \rightarrow (j, t)$, а минимум суммарной стоимости потока совпадает с целевой функцией (3) при $F = 0$.

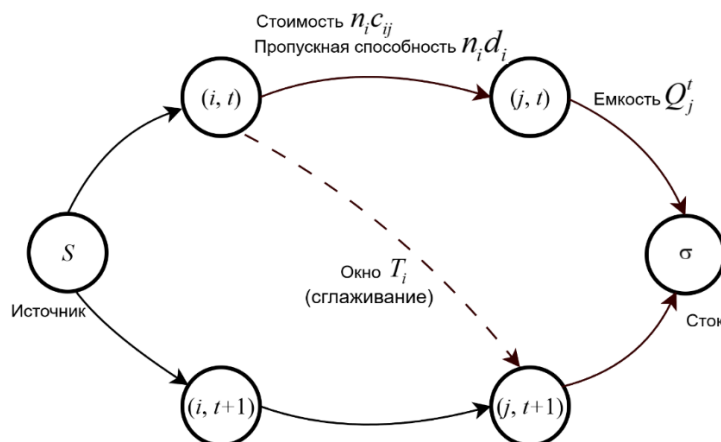


Рис. 1. Фрагмент расширенной во времени сети для задачи о потоке минимальной стоимости:

узлы требований (i, t) и площадок (j, t) , источник S и сток σ ;

пунктир – дуга обслуживания в смежном периоде при включённом сглаживании

Возврат переменных y_j и условия (6) превращает нашу задачу в задачу о потоке с фиксированной стоимостью открытия объекта: топология сети не меняется, а факт активации площадки моделируется отдельной «открывающей» дугой. Такое прочтение полезно по двум причинам. Сначала – расширение окна T_i при включённом сглаживании автоматически делает выбор периода обслуживания частью того же потокового решения. Затем оно прокладывает «мост» к динамическим задачам: цепочкам ремонтов одной машины за срок службы, её перемещениям между площадками, увязке с нитками графика. Это направление вынесено за рамки данной статьи и планируется в дальнейших исследованиях.

3 Стратегический уровень: метод анализа иерархий, TOPSIS и робастная оценка

Задача (3)–(8) оптимизирует размещение при заданном сценарии развития сети. Сам сценарий – целевой уровень сокращения плеч и режим сглаживания сезонной загрузки – выбирается на стратегическом уровне многокритериально по трём минимизируемым критериям: *технология* – K_1 – среднее плечо доставки в ремонт, км; *экономика* – K_2 – приведённые годовые затраты, руб./год; *перевозочный процесс* – K_3 – число снятых ниток грузового движения, нитки/год.

Веса критериев вычисляются методом анализа иерархий [10] на основе матрицы парных сравнений $A = (a_{kl})$, $k, l = 1, \dots, n$, где a_{kl} характеризует относительную важность критерия k по сравнению с критерием l . Компоненты вектора весов вычисляются как нормированные средние геометрические элементов строк матрицы:

$$w_k = \frac{\left(\prod_{l=1}^n a_{kl} \right)^{1/n}}{\sum_{p=1}^n \left(\prod_{l=1}^n a_{pl} \right)^{1/n}}, \quad k = 1, \dots, n, \quad \sum_{k=1}^n w_k = 1, \quad w_k \geq 0. \quad (9)$$

Согласованность экспертных оценок проверяется по отношению согласованности $CR = \frac{CI}{RI}$, где

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad \lambda_{\max} - \text{максимальное собственное значение матрицы парных сравнений, } RI - \text{случай-}$$

ный индекс согласованности. Матрица считается согласованной при выполнении условия $CR < 0,1$.

Ранжирование сценариев выполняется методом TOPSIS [10] по коэффициенту близости к идеальной точке. Этот метод основан на концепции, согласно которой выбранная альтернатива должна иметь кратчайшее геометрическое расстояние от положительного идеального решения, обозначим его D^+ , и наибольшее геометрическое расстояние от отрицательного идеального решения – D^- . Коэффициент относительной близости сценария s к идеальному решению определяется выражением:

$$C^*(s) = \frac{D^-(s)}{D^+(s) + D^-(s)}, \quad C^*(s) \in [0, 1], \quad (10)$$

где $D^+(s)$, $D^-(s)$ – евклидовы расстояния взвешенного нормированного вектора критериев сценария до идеальной и антиидеальной точек; оптимальным признаётся сценарий с максимальным $C^*(s)$.

Экономический критерий K_2 характеризует приведённые годовые затраты и определяется как годовой эквивалент совокупной стоимости жизненного цикла ремонтной сети:

$$K_2 = C_{rem} + C_{tr} + C_{nedozagr} + AK, \quad (11)$$

где C_{rem} , C_{tr} , $C_{nedozagr}$ – годовые затраты, соответственно, на выполнение годового ремонта, транспортные потери и на непроизводительную недозагрузку ремонтного персонала; K – капитальные вложения в развитие и модернизацию ремонтной сети; A – коэффициент приведения капитальных затрат к годовому эквиваленту (аннуитетный коэффициент), который определяется выражением:

$$A = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1}, \quad (12)$$

где r – ставка дисконтирования (*discount rate*); T – расчетный горизонт планирования.

Для обеспечения робастности стратегического выбора к неопределённости программы путевых работ выполняется анализ сценариев по множеству коэффициентов масштабирования:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\},$$

характеризующих возможные уровни изменения производственной программы.

Для каждого сценария s значение критерия F определяется как среднее по всем элементам множества P :

$$\bar{F}(s) = \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} F(s, p), \quad (13)$$

где $F(s, p)$ – значение рассматриваемого критерия для сценария s при коэффициенте масштабирования p , а $|P|$ – число рассматриваемых вариантов изменения производственной программы.

Сравнение сценариев ведётся по робастным оценкам $\bar{F}(s)$, что делает стратегический выбор независимым от точечного прогноза программы. На рис. 2 приведена диаграмма ранжирования восьми управляемых состояний сети по коэффициенту близости к идеальному решению C^* с применением метода TOPSIS. Апробация проводилась в условиях Восточного полигона. Выделены два лидирующих состояния.

4 Апробация на Восточном полигоне

Уточним, что в масштабе всего проекта исследование еще находится в стадии разработки. Приведем пояснения и уточнения для представленных в данной статье результатов. Математический аппарат (формулы (3)–(13)) реализован в виде специализированного программного комплекса. Программная реализация была выполнена на языке программирования Python с использованием открытого программного обеспечения. Для решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования применён свободно распространяемый решатель Coin-or Branch and Cut, подключённый через

библиотеку PuLP (модули расчётного ядра и многокритериального выбора). Разработанный на основе нашей математической модели программный комплекс был апробирован и применён к условиям Восточного полигона со следующими параметрами: около восьмидесяти площадок-кандидатов, несколько сотен групп заявок, горизонт – двенадцать месяцев. Числовые результаты – средневзвешенное плечо доставки, число снятых ниток, приведённые годовые затраты по восьми сценариям развития сети – приводятся диапазонами с анализом чувствительности; рекомендуемое число активных ремонтных участков оценивается диапазоном. Устойчивым (не зависящим от значений допущений) результатом является адресный приоритет развития восточной части полигона. Валидация расчётного ядра выполнена ретроспективным прогнозом на истории ремонтов 2021–2025 гг. с расхождением около 2 %.

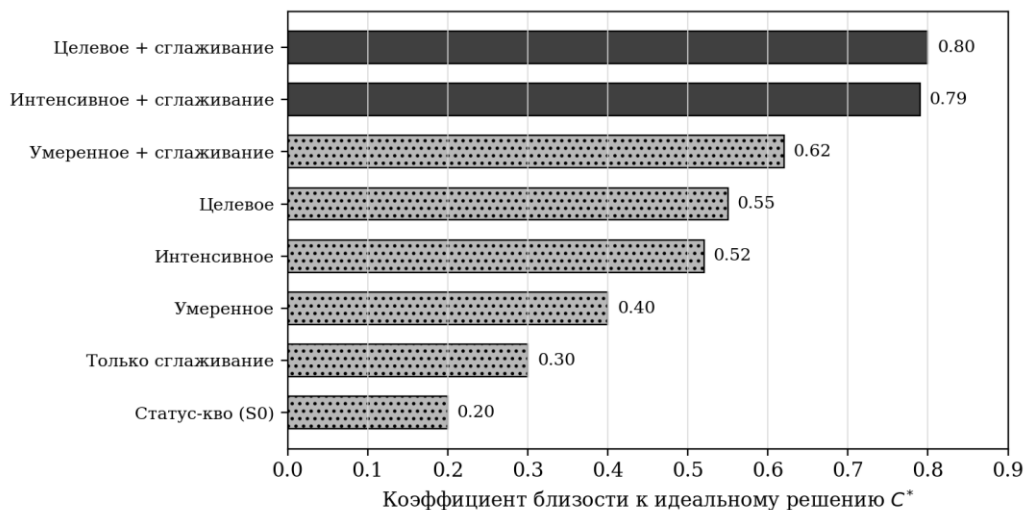


Рис. 2. Ранжирование управляемых состояний сети по коэффициенту близости к идеальному решению

Заключение

Предложенная постановка соединяет операционно-тактический уровень (строгое решение задачи целочисленного программирования для размещения под заданный сценарий) и стратегический уровень (многокритериальный робастный выбор сценария), что отличает её от одноуровневых постановок размещения. Три отличительных элемента – фильтр *sapability* (способность), порог рентабельности и явная ось периодов – введены не как абстрактные обобщения, а как формализация конкретных свойств ремонта СПС: аттестации участков, минимальной рентабельной загрузки и сезонности ремонтной кампании. Эквивалентность задаче о потоке минимальной стоимости на расширенной во времени сети обеспечивает связь с классическим аппаратом сетевых потоков и открывает направление перехода к динамическим задачам управления ремонтным производством. Ограничения постановки – экзогенность программы путевых работ (учитываемая диапазонным прогнозом) и зависимость числовых результатов от значений ёмкости, окон и порога – определяют программу дальнейшей валидации параметров и продолжения исследования.

Список литературы

- 1 **Hakimi, S. L.** Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph-theoretic problems / S. L. Hakimi // Operations Research. – 1965. – Vol. 13, No. 3. – P. 462–475.
- 2 **Daskin, M. S.** Network and discrete location : models, algorithms and applications / M. S. Daskin. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 494 p.
- 3 Discrete location theory / ed. by P. B. Mirchandani, R. L. Francis. – New York : Wiley, 1990. – 555 p.

References

- 1 **Hakimi, S. L.** Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph-theoretic problems / S. L. Hakimi // Operations Research. – 1965. – Vol. 13, No. 3. – P. 462–475.
- 2 **Daskin, M. S.** Network and discrete location : models, algorithms and applications / M. S. Daskin. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2013. – 494 p.
- 3 Discrete location theory / ed. by P. B. Mirchandani, R. L. Francis. – New York : Wiley, 1990. – 555 p.

4 Location Science / ed. by G. Laporte, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2019. – 767 p.

5 **Church, R. L.** Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem / R. L. Church, C. S. ReVelle // *Geographical Analysis*. – 1976. – Vol. 8, No. 4. – P. 406–415.

6 **ReVelle, C. S.** Location analysis : a synthesis and survey / C. S. ReVelle, H. A. Eiselt // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – Vol. 165, No. 1. – P. 1–19.

7 Optimum location analysis for an infrastructure maintenance depot in urban railway networks / Eu Wang Kim, Seok Kim // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2021. – DOI 10.1007/s12205-021-1496-5.

8 **Tönissen, D. D.** The maintenance location choice problem for railway rolling stock : Preprint / D. D.-Tönissen, J. J. Arts. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2012.04565> (date of access: 25.05.2026).

9 **Ford, L. R.** Flows in Networks / L. R. Ford, D. R. Fulkerson. – Princeton : Princeton University Press, 1962. – 194 p.

10 **Саати, Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. П. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.

11 **Hwang, C. L.** Multiple attribute decision making : methods and applications. A state-of-the-art survey / C.-L. Hwang, K. Yoon // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. – Vol. 186. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1981.

12 **Melo, M. T.** Facility location and supply chain management : a review / M. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama // *European Journal of Operational Research*. – 2009. – Vol. 196, No. 2. – P. 401–412.

13 Единые правила технической эксплуатации и ремонта специального самоходного подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2024 № 3341/р. – Москва, 2024. – 312 с.

14 Положение о системе планово-предупредительного ремонта специального подвижного состава : распоряжение ОАО «РЖД» от 14.03.2014 № 659/р (с изменениями от 13.03.2026). – Москва, 2014. – URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-19122016-n-2585r-ob-utverzhenii/> (дата обращения 12.06.2026).

4 Location Science / ed. by G. Laporte, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2019. – 767 p.

5 **Church, R. L.** Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem / R. L. Church, C. S. ReVelle // *Geographical Analysis*. – 1976. – Vol. 8, No. 4. – P. 406–415.

6 **ReVelle, C. S.** Location analysis : a synthesis and survey / C. S. ReVelle, H. A. Eiselt // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – Vol. 165, No. 1. – P. 1–19.

7 Optimum location analysis for an infrastructure maintenance depot in urban railway networks / Eu Wang Kim, Seok Kim // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2021. – DOI 10.1007/s12205-021-1496-5.

8 **Tönissen, D. D.** The maintenance location choice problem for railway rolling stock : Preprint / D. D.-Tönissen, J. J. Arts. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2012.04565> (date of access: 05/25/2026).

9 **Ford, L. R.** Flows in Networks / L. R. Ford, D. R. Fulkerson. – Princeton : Princeton University Press, 1962. – 194 p.

10 **Saaty, T.** Decision making. The Analytic hierarchy process / T. Saaty ; translated from English by R. G. Vachnadze. – Moscow : Radio i Svyaz, 1993. – 278 p.

11 **Hwang, C. L.** Multiple attribute decision making : methods and applications. A state-of-the-art survey / C.-L. Hwang, K. Yoon // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. – Vol. 186. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1981.

12 **Melo, M. T.** Facility location and supply chain management : a review / M. T. Melo, S. Nickel, F. Saldanha-da-Gama // *European Journal of Operational Research*. – 2009. – Vol. 196, No. 2. – P. 401–412.

13 Uniform rules for the technical operation and repair of special self-propelled rolling stock : Order of JSC Russian Railways dated 12/27/2024 No. 3341/r. – Moscow, 2024. – 312 p.

14 Regulations on the system of scheduled preventive maintenance of special rolling stock : Order of JSC Russian Railways dated 03/14/2014 No. 659/r (as amended on 13.03.2026). – Moscow, 2014. – URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-19122016-n-2585r-ob-utverzhenii/> (date of access: 06/12/2026).

*A. A. Lokhmatov***THE MULTI-CRITERIA TASK OF LOCATING REPAIR SITES FOR SPECIAL SELF-PROPELLED ROLLING STOCK: MULTIPERIODIC FORMULATION AND EQUIVALENCE TO THE MINIMUM COST FLOW PROBLEM**

Abstract. The paper considers the problem of placement, specialization, and development of a network of repair sites for special self-propelled rolling stock as a spatially distributed complex of railway transport infrastructure. The relevance of the task is substantiated. A formal formulation of the placement problem in a multi-period form is proposed, which differs from the previous one by simultaneously considering a binary tolerance filter, the profitability threshold for the production site, and an explicit axis of planning periods, which allows for the description of seasonal unevenness in the repair campaign. The equivalence of the problem (when the binary activation variables are removed) to the minimum cost flow problem on a time-extended network is proven, and the inclusion of activation variables and the breakeven point transforms it into a problem of minimizing the cost of a flow with a fixed cost of an object. The operational and tactical level (integer linear programming) is complemented by the strategic level of multi-criteria selection of a network development scenario using hierarchical analysis and ordering based on proximity to the ideal solution with robust assessment of the range of the track maintenance program. The approach has been tested under the conditions of the Eastern Polygon of JSC Russian Railways. The sustainable result is the targeted priority for the development of the eastern part of the network.

Keywords: repair site placement, special self-propelled rolling stock, capacity-constrained allocation problem, multi-period formulation, minimum cost flow, time-extended network, analytic hierarchy process, TOPSIS method, Eastern Polygon.

For citation: Lokhmatov, A. A. The multi-criteria task of locating repair sites for special self-propelled rolling stock: multiperiodic formulation and equivalence to the minimum cost flow problem / A. A. Lokhmatov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 21–29. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_21.

Сведения об авторах

Лохматов Алексей Анатольевич
Открытое акционерное общество
«Российские железные дороги»
(ОАО «РЖД»),
Центральная дирекция инфраструктуры,
г. Москва,
заместитель главного инженера,
e-mail: lokhmatov@bk.ru

Information about the authors

Lokhmatov Alexey Anatolyevich
Open Joint Stock Company
“Russian Railways” (JSC “RZD”),
Central Directorate of Infrastructure,
Moscow,
Deputy Chief Engineer,
e-mail: lokhmatov@bk.ru