

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная статья

УДК 656.22:629.4

EDN: <https://elibrary.ru/gdkfwk>

Установление баланса тяговых ресурсов на основе анализа колебаний скоростей поездопотоков и величины потребных резервов тяги

Н. В. Корниенко✉, М. И. Мехедов, А. Г. Котенко

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В основе рациональной эксплуатации локомотивного парка лежит увязка графика оборота локомотивов с графиком движения поездов, где предполагается безусловное выполнение нормативных заданий по перевозкам и не менее жесткое соблюдение нормативов на технические и технологические операции с локомотивами, поездами на станциях оборота и перецепки локомотивов. Цель увязки — установление баланса локомотивов в местах размена тяги. Однако в ходе осуществления перевозочного процесса внутрисуточная неравномерность дислокации эксплуатируемого парка достигает значительных размеров и приводит к нарушению баланса. В этой связи требуется создание механизма организации подсылки тяговых ресурсов к станциям их оборота и перецепки, что позволит гарантировать сохранение баланса тяги в местах размена, компенсировать влияние внутрисуточной неравномерности дислокации эксплуатируемого парка, повысить степень рациональной эксплуатации парка локомотивов, усилить пропускную способность линий.

Материалы и методы. Решение задачи сохранения баланса тяговых ресурсов на станциях оборота и перецепки локомотивов во внутрисуточных интервалах реализовано методами интервального регулирования тяговых ресурсов.

Результаты. Предложен подход к установлению баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока как наиболее простому виду станций оборота и перецепки (как правило, не имеют дополнительных примыканий, используя при этом размен тяги по направлениям «один к одному»). Подход основан на применении зависимости между колебаниями скоростей поездопотоков и величиной потребных резервов тяги во внутрисуточных трехчасовых интервалах.

Обсуждение и заключение. Использование предлагаемого подхода позволяет повысить эффективность технологии установления баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока, создать основы для построения механизма подсылки резерва по регулировке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железные дороги, перевозочный процесс, участковая скорость, баланс тяговых ресурсов, технология интервального регулирования, резерв тяговых ресурсов, подсылка резерва по регулировке

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Корниенко Н. В., Мехедов М. И., Котенко А. Г. Установление баланса тяговых ресурсов на основе анализа колебаний скоростей поездопотоков и величины потребных резервов тяги // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 248–257.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.22:629.4

EDN: <https://elibrary.ru/gdkfwk>



Balancing traction resources based on fluctuations in train speeds and required traction reserves

Natalya V. Kornienko✉, Mikhail I. Mekhedov, Alexey G. Kotenko

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The rational operation of the locomotive fleet is based on coordination of the locomotive turnover schedule with the train traffic schedule that assume unconditional fulfillment of standard transportation jobs and no less strict compliance with technical and technological standards for locomotive and train operations at locomotive turnover and re-coupling stations. Coordination is intended to set up balance of locomotives at traction interchange points. However, in the course of transportation, the intra-day dislocation of the operating fleet reaches significant unevenness and leads to imbalance. This requires a system for dispatching traction resources to their turnover and re-coupling stations which will help to preserve traction balance at the interchange points to compensate for uneven intra-day dislocation of the operating fleet, rationalise the locomotive fleet operations, and improve line capacity.

Materials and methods. The balance of traction resources at locomotive turnover and re-coupling stations in intra-day intervals is achieved by interval regulation of traction resources.

Results. The paper proposes an approach to establishing a balance of traction resources at current interlocking stations as the simplest type of turnover and recoupling stations (as a rule, they do not have additional adjacencies, using a one-to-one traction exchange). The approach applies the correlation between fluctuations in train traffic speeds and the amount of required traction reserves within daily three-hour intervals.

Discussion and conclusion. This approach helps to improve the traction resource balancing technology at the current junction stations, and create a basis for building a mechanism for dispatching regulation reserves.

KEYWORDS: railways, transportation process, service speed, traction resources balance, interval regulation technology, reserve traction resource, dispatching regulation reserves

FOR CITATION: Kornienko N. V., Mekhedov M. I., Kotenko A. G. Balancing traction resources based on fluctuations in train speeds and required traction reserves. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):248-257. (In Russ.).

Введение. В основе расчета потребного эксплуатационного парка локомотивов лежит увязка графика движения поездов с графиком оборота локомотивов при условии соблюдения установленных нормативов на технические и технологические операции с локомотивами, поездами, а также обеспечения их минимальных простоев на станциях оборота и перецепки локомотивов. Качество проводимой увязки во многом зависит от соблюдения баланса количества локомотивов эксплуатационного парка грузового движения. Для учета возможных перестроек структуры поездопотока, колебаний размеров движения, рассогласований парности по причине изменений межпоездных интервалов и скоростей движения поездов, а также ошибок оперативного регулирования увязка включает в себя закрепление резервов тяговых ресурсов на станциях оборота и перецепки, что, хотя и обуславливает избыточность эксплуатируемого парка, но препятствует нарушению баланса тяговых ресурсов в местах размена, подчиняя размер парка требованиям неравномерности движения. Реализация увязанного графика оборота локомотивов подразумевает внесение корректировок как в помесечную, так и в посуточную увязку с графиком движения поездов. Поддержка баланса внутри суток подчинена требованиям интервального регулирования тяговых ресурсов [1].

Вместе с тем в ходе осуществления перевозочного процесса внутрисуточная неравномерность дислокации эксплуатируемого парка, т. е. его перенасыщение или недостаток на отдельных участках полигонов, достигает значительных размеров. Резервов тяги в местах размена оказывается недостаточно, баланс нарушается, и согласно технологии интервального регулирования выполнение графика определяется своевременностью переброса резервов локомотивов с одной станции размена тяги на другую [2, 3]. Однако такой переброс ввиду отсутствия устойчивых механизмов организации подсылки тяговых ресурсов, значительной протяженности участков обращения локомотивов, недостатка информации о наличии резервов тяги в местах близлежащего размена и большой стоимости резервного пробега локомотивов как инструмент регулировки практически не используется, и размен тяги на станциях оборота и перецепки поддерживается по выходу локомотивов из пункта технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). Это приводит к остановкам работы станций, неритмичности приема поездов, существенному снижению пропускной способности [4].

В этой связи актуальной и важной целью является решение научной проблемы создания механизма организации подсылки тяговых ресурсов к станциям их оборота и перецепки. Достижение этой цели позволит не только компенсировать влияние на баланс тяговых ресурсов внутрисуточной неравномерности дислокации эксплуатируемого парка, но и в целом

повысить степень рациональной эксплуатации парка локомотивов, усилить пропускную способность линий.

Постановка задачи. В первом приближении проблема может быть решена применительно к станциям стыкования родов тока — наиболее простому виду станций оборота и перецепки, где происходит 100% размен поездных локомотивов и локомотивных бригад для дальнейшего продвижения поездопотока [5, 6]. Станции стыкования родов тока, как правило, не имеют дополнительных примыканий, используя размен по направлениям «один к одному» (рис. 1).

Модель баланса тяговых ресурсов на таких станциях может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}} \right]^{\text{неч}} = \\ = \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}} \right]^{\text{чет}}; \\ \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}} \right]^{\text{чет}} = \\ = \left[\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}} \right]^{\text{неч}}, \end{cases} \quad (1)$$

где левая часть уравнения содержит сумму величин тяговых ресурсов по отправлению, а правая — по прибытию. При этом слагаемые $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{отпр}}$, $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}}$ и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}}$ отражают количество локомотивов i -х серий, отправленных со станции с поездами по перецепке ($\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер отпр}}$), по выходу из ПТОЛ, а также по регулировочному заданию, а слагаемые $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пр}}$, $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}}$, $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}}$ — количество локомотивов i -х серий, прибывших на станцию с поездами для перецепки ($\sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер пр}}$), захода в ПТОЛ, а также по регулировочному заданию.

Для соблюдения равенства частей в модели баланса (1) значения скоростей входящих поездопотоков встречных направлений $v_{\text{потока}}^{\text{вх чет/неч}}$ должны быть максимально приближены друг к другу

$$v_{\text{потока}}^{\text{вх чет}} \approx v_{\text{потока}}^{\text{вх неч}}. \quad (2)$$

Однако ввиду распространенной разницы заложенных в графике движения поездов скоростей и размеров входящих с противоположных направлений поездопотоков

$$N^{\text{вх чет}} \neq N^{\text{вх неч}}, \quad v_{\text{потока}}^{\text{вх чет}} \neq v_{\text{потока}}^{\text{вх неч}} \quad (3)$$

соблюсти равенство слагаемых одной части (1) соответствующим слагаемым другой в процессе увязки, как правило, не удастся, и в графике оборота локомотивов ни одна из составляющих баланса тяговых ресурсов не равна другой:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер отпр}} \neq \sum_{i=1}^n M_i^{\text{пер пр}}; \\ \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ отпр}} \neq \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ пр}}; \\ \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл отпр}} \neq \sum_{i=1}^n M_i^{\text{сл пр}}. \end{cases} \quad (4)$$

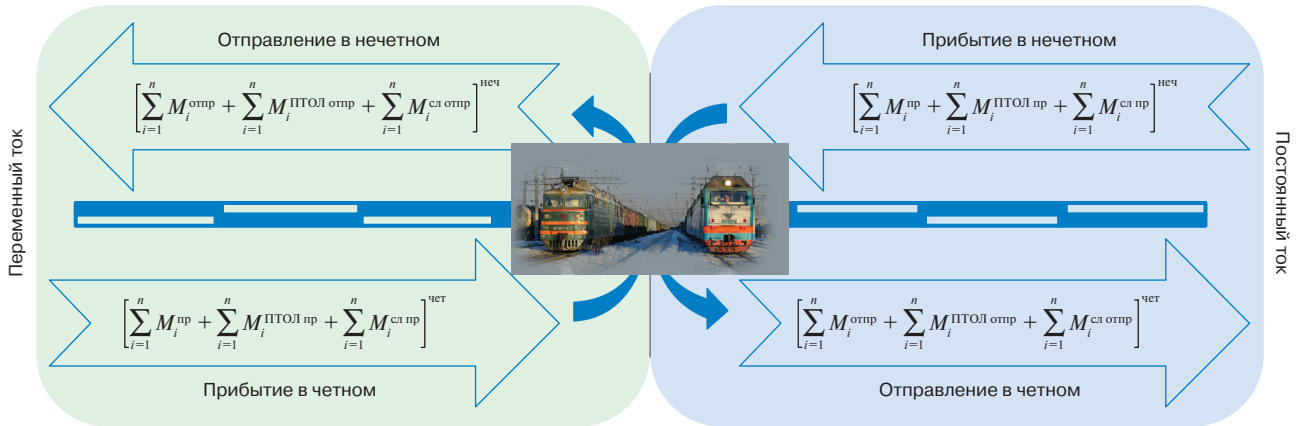


Рис. 1. Система размена тяги на станциях стыкования родов тока

Fig. 1. Traction exchange system at current junction stations

Важно, что условия непарности (4), связанные с разностью частот $\Delta M^{\text{отпр/пр}}$ модели (1) и разностью $\Delta v^{\text{вх чет/неч}}$ (3), связанной с разницей $\Delta M^{\text{вх чет/неч}}$, присутствуют в графиках в виде постоянных величин

$$\begin{cases} \Delta M^{\text{отпр/пр}} = \text{const}; \\ \Delta M^{\text{вх чет/неч}} = \text{const}; \\ \Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}} = \text{const} \end{cases} \quad (5)$$

и соответствуют друг другу

$$\begin{cases} \Delta M^{\text{отпр/пр}} = f(\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}); \\ \Delta M^{\text{отпр/пр}} = f(\Delta M^{\text{вх чет/неч}}); \\ \Delta M^{\text{вх чет/неч}} = f(\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}), \end{cases} \quad (6)$$

чем и обуславливают справедливость выражения (1).

Вместе с тем на практике внутрисуточная неравномерность перевозок создает на станции ситуацию, когда в течение длительного периода времени проявляется рассогласование фактического времени подвода локомотивов в составе прибывающих поездов с противоположных направлений с графиковым временем [7, 8]. Условия (5) и (6) также рассогласовываются. В соответствии с проведенными исследованиями причиной такого рассогласования является существенная разница между значениями графиковых и реальных скоростей входящих поездопотоков встречных направлений $v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}$. Несоблюдение графиковых условий (4)–(6) обуславливает невозможность достижения баланса локомотивов и полного размена тяги.

Задача установления баланса тяговых ресурсов в этом случае может быть решена за счет использования резерва локомотивов [9–11]. Модель резерва тяговых

ресурсов (РТР), применяемая сегодня на практике и позволяющая гарантировать размен тяги, в общем виде выглядит так¹:

$$\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РТР}} = \sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}}, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}}$ — нормативный резерв

$$\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}} = \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦТ}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦД}}, \quad (8)$$

включающий две составляющие: $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦТ}}$ — локомотивы технологического резерва, определенные Дирекцией тяги, и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ЦД}}$ — локомотивы оперативного резерва, определенные Дирекцией управления движением; $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}}$ — регулировочный резерв

$$\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}} = \sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ}} + \sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл}}, \quad (9)$$

также включающий в себя две части: $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ}}$ — локомотивы, прогнозируемые к выходу из ПТОЛ, и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл}}$ — локомотивы, прогнозируемые к подсылке по регулировочному заданию.

Очевидно, что регулировочный резерв $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{РР}}$ предназначен для ввода в действие при исчерпании нормативного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}}$, его величина не может быть определена заранее и должна подчиняться условиям расхода $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР}}$, поставленным согласно (3), (6) в зависимости от разности скоростей $\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}$.

Следует отметить, что $\Delta v^{\text{вх чет/неч}}_{\text{потока}}$ можно представить разными видами скоростей [12]. Однако применительно к проводимому исследованию целесообразно использовать участковые скорости $v_{\text{уч}}$ как наиболее точно описывающие динамику изменения движения потоков поездов на участках приближения к станции.

¹ Об утверждении временной методики расчета среднесуточного на планируемый месяц количества локомотивов эксплуатируемого парка, оставляемых в оперативный резерв Центральной дирекции управления движением — филиала ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 28 октября 2014 г. № 428 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 24.06.2024).

Таким образом, исследования показывают, что задача установления баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока может быть решена на основе поиска зависимости между величиной потребного регулировочного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{PP}$ (и прежде всего потребной величиной подсылки $\sum_{i=1}^n M_i^{доп\ сл}$) и разницей прогнозных значений входящих поездопотоков встречных направлений, выраженных через разность участковых скоростей $\Delta v_{уч}^{вх\ чет/неч}$.

Методы исследования. Как отмечалось, на практике задача обеспечения баланса тяговых ресурсов внутри суточного интервала решается в рамках технологии интервального регулирования, которая вводит понятия и оперирует понятиями тяговыми ресурсами, а также сокращенной схемой подвозки тяговых ресурсов к поездам в условиях изменения оперативной обстановки.

Технология интервального регулирования делит сутки на трехчасовые интервалы, и модель регулировочного резерва тягово-графиковых ресурсов в рамках технологии соответствует модели (7), но применительно к рассматриваемому интервалу:

$$\sum_{i=1}^n M_i^{PP\ 3ч} = \sum_{i=1}^n M_i^{ПТОЛ\ 3ч} + \sum_{i=1}^n M_i^{доп\ сл\ 3ч}. \quad (10)$$

Анализ эксплуатационной работы приводит к выводу, что из двух составляющих $\sum_{i=1}^n M_i^{PP\ 3ч}$ сегодня на станциях стыкования родов тока активно используется потенциал $\sum_{i=1}^n M_i^{ПТОЛ\ 3ч}$ и практически не используются возможности $\sum_{i=1}^n M_i^{доп\ сл\ 3ч}$ [13, 14].

Вместе с тем, согласно проведенным исследованиям работы станций за период 2019–2022 гг., в среднем за сутки 30 % всех прибывающих с поездами электровозов обоих родов тока поступает на ПТОЛ для проведения технического обслуживания ТО-2, а доля такого элемента, как «проход локомотивом контрольного поста до захода на смотровую канаву для проведения ТО-2» (далее — «от КП до ТО-2»), в обороте локомотива по станции равна 40 %, при этом время ожидания освобождения стойл для проведения ТО-2 электровозам постоянного и переменного тока составляет от 1 ч и более [15]. Результатом непроизводительных простоев поездных локомотивов из-за ожидания проведения ТО-2 являются задержки поездов обоих направлений на подходах к станции по причине «невыдача локомотива из эксплуатационного депо на график» № 2226ПД, 2564 (рис. 2, 3) и 2579ПМ, 2225ТПМ (рис. 4, 5).

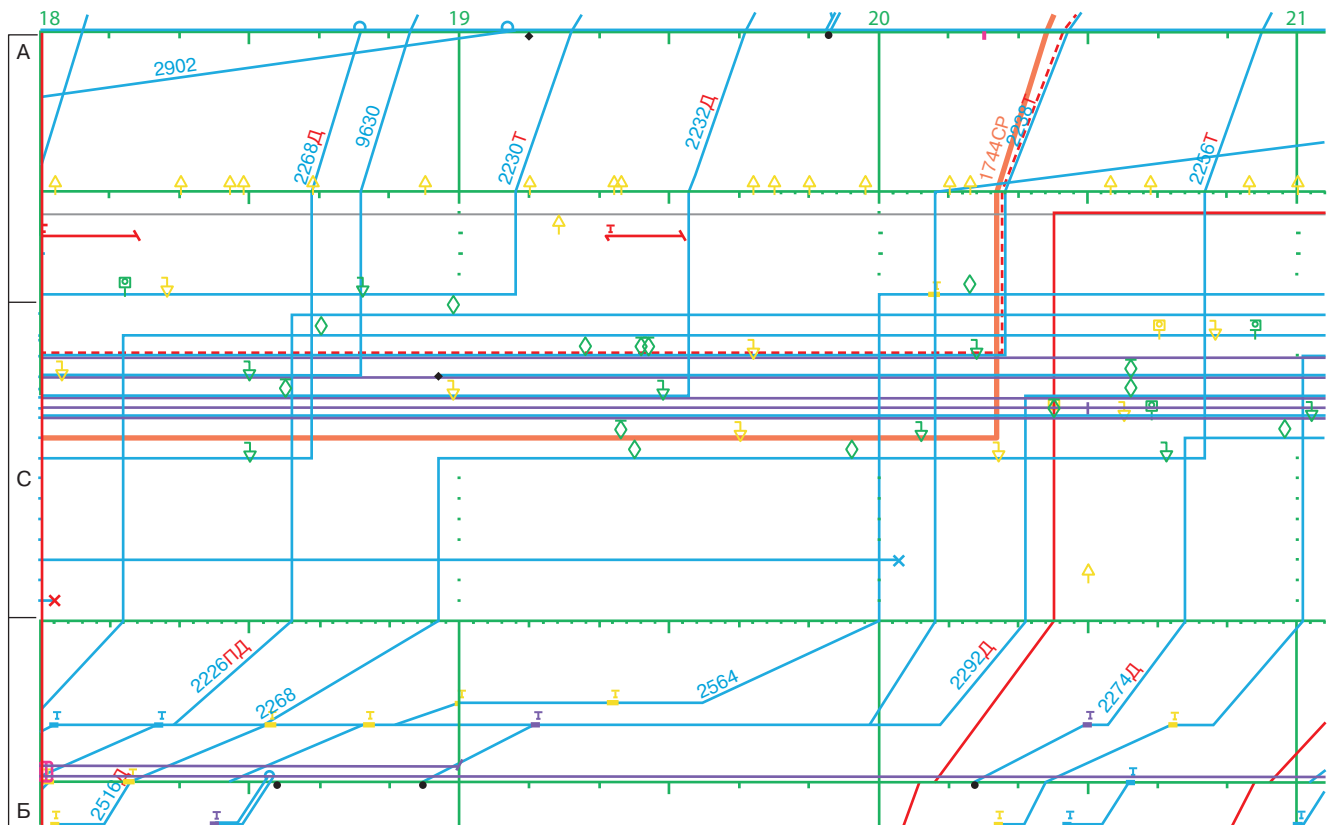


Рис. 2. Пример задержек четных поездов в интервале с 18:00 до 21:00

Fig. 2. Example of delays of even-numbered trains from 18:00 to 21:00

Согласно данным программного комплекса управления эксплуатационной работой ГИД «Урал-ВНИИЖТ», в среднем за сутки только по одной станции стыкования родов тока может быть задержано более 20 поездов нечетного направления, что составляет порядка 35 % от общего числа поездов при среднем времени задержки одного поезда 0,2 ч, и более 30 поездов четного направления (50 % от общего числа) при среднем времени задержки одного поезда 0,5 ч.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод о неэффективности отдельного применения $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ 3 ч}}$ как основы регулировочного резерва, в связи с чем и возникает необходимость использования подсылки тяговых ресурсов $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл 3 ч}}$ как базового инструмента регулировки.

Решение поставленной задачи. Результаты. Как обсуждалось ранее, установление баланса тяговых ресурсов за счет регулировочного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{PP}}$ (9) целесообразно выполнять при исчерпании нормативного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{HP}}$ (8). При этом ключевым звеном решения задачи становится прогноз возможной величины подсылки $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл 3 ч}}$, которая может быть выражена через $\Delta M^{\text{прог 3 ч}}$ — величину отклонения подвода локомотивов от заданного графиком. Схема предлагаемого подхода к определению и использованию $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл 3 ч}}$ для подвозки локомотива к поезду в трехчасовом интервале представлена на рис. 6.

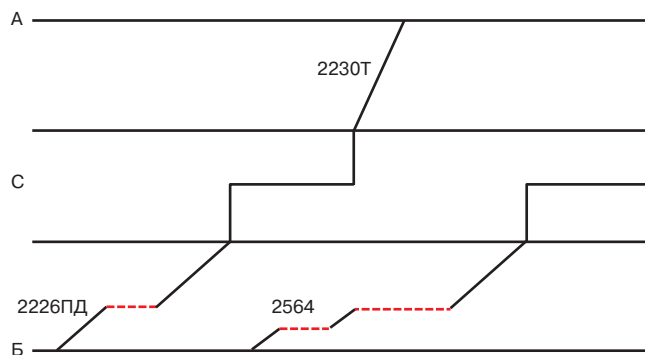


Рис. 3. Фрагмент рис. 2. Задержки поездов № 2226ПД, 2564: — задержка поездов четного направления на подходе к станции стыкования родов тока С

Fig. 3. Fragment of Fig. 2. Train No. 2226PD, 2564 delays: — delay of even-numbered trains on the approach to the current junction station C

Согласно схеме (рис. 6) в случае исчерпания нормативного резерва тяговых ресурсов $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{HP 3 ч}}$ проводится анализ возможности выдачи необходимого числа локомотивов в заданное время из ПТОЛ $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ 3 ч}}$ (как части регулировочного резерва $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{PP 3 ч}}$) с проверкой соответствия характеристик каждого предназначенного к выдаче локомотива характеристикам предназначенного к отправлению поезда (блок 1) и принятием решения о подвозке локомотива

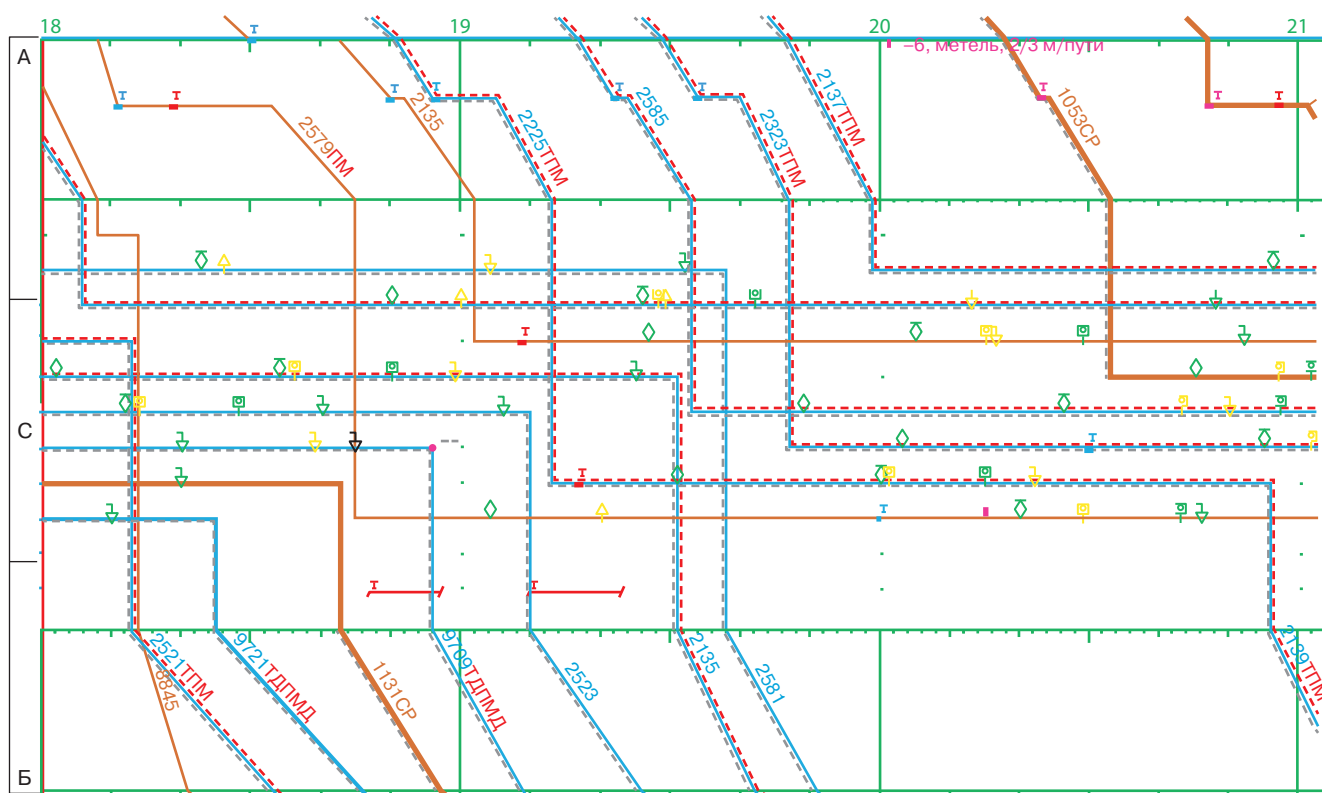


Рис. 4. Пример задержек нечетных поездов в интервале с 18:00 до 21:00

Fig. 4. Example of delays of odd-numbered trains from 18:00 to 21:00

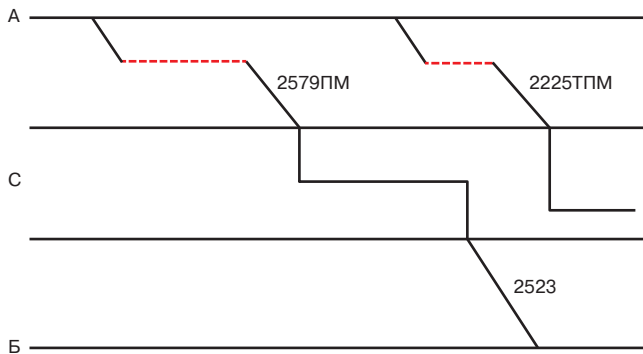


Рис. 5. Фрагмент рис. 4. Задержки поездов № 2579ПМ, 2225ТПМ:

----- задержка поездов нечетного направления на подходе к станции стыкования родов тока С
Fig. 5. Fragment of Fig. 4. Train No. 2579PM, 2225TPM delays: ----- delay of odd-numbered trains on the approach to the current junction station C

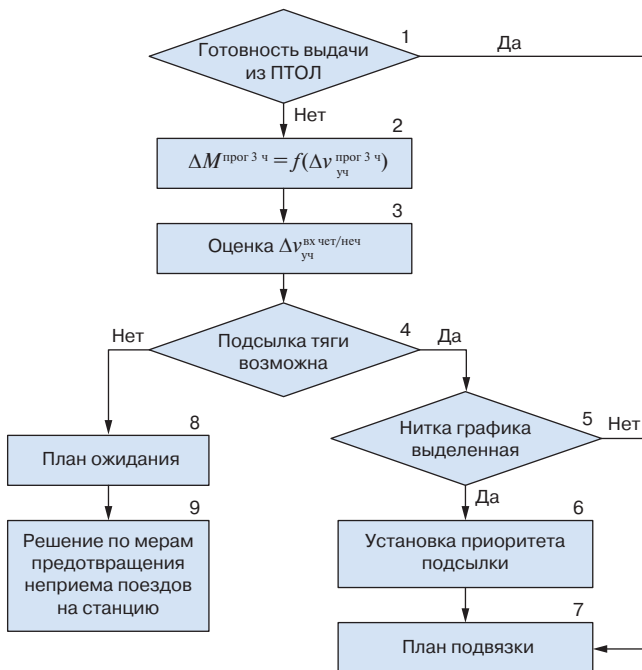


Рис. 6. Схема предлагаемого подхода к организации подвязки в трехчасовом интервале при исчерпании нормативного резерва

Fig. 6. Proposed organisation of coupling in a three-hour interval with the depletion of standard reserve

к нитке графика движения поездов (блок 7). При несоответствии характеристик локомотива, предназначенного к выдаче из ПТОЛ, характеристикам поезда или отсутствию такого локомотива на основе прогнозного графика движения поездов определяется отклонение участковых скоростей встречных потоков поездов $\Delta v_{уч}^{прог 3 ч}$ друг от друга в прогнозируемом трехчасовом интервале и активизация зависимости $\Delta M^{прог 3 ч} = f(\Delta v_{уч}^{прог 3 ч})$ для расчета величины $\Delta M^{прог 3 ч}$ в планируемом трехчасовом интервале как отклонения

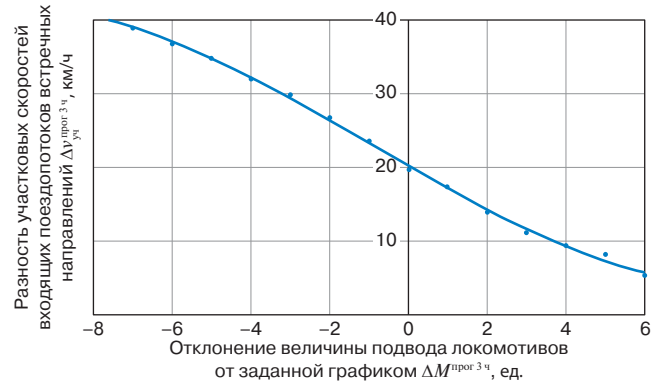


Рис. 7. Внутрисуточная зависимость величины подсылки тяговых ресурсов от баланса участковых скоростей встречных потоков поездов по трехчасовым интервалам

Fig. 7. Intra-day dependence of the dispatched amount of traction resources on the balance of service speeds of oncoming train flows at three-hour intervals

от числа локомотивов подвода, заданного графиком (блок 2). Далее выполняется проверка наличия избытка тяговых ресурсов соответствующих серий на близлежащих станциях полигона и осуществляется оценка значения участковой скорости поездопотока соответствующих направлений $v_{уч}^{вх чет/неч}$ (блок 3) и возможности подсылки тяговых ресурсов по регулировке (блок 4). При наличии такой возможности устанавливается приоритет подсылки (блок 6) в зависимости от категории нитки графика (блок 5) и принимается предварительное решение о подвязке локомотива к поезду (блок 7). При отсутствии возможности подсылки не обеспеченная тяговым ресурсом нитка графика заносится в план ожидания по обеспечению тягой (блок 8) и осуществляются меры по предотвращению неприятия поездов на станцию (блок 9).

Предлагаемая схема не противоречит практике работы, но содержит новый элемент: зависимость $\Delta M^{прог 3 ч} = f(\Delta v_{уч}^{прог 3 ч})$ (блок 2), установленную на основе анализа статистических данных в рамках исследования.

В ходе анализа в качестве базового периода был принят год, наихудший по показателям эксплуатационной работы. За каждые сутки анализируемого периода исследовались данные на основе исполненных графиков движения поездов, что дало возможность установить сначала наличие среднесуточной зависимости $\Delta M^{прог сут} = f(\Delta v_{уч}^{прог сут})$, а затем и среднеинтервальной (внутрисуточной) зависимости $\Delta M^{прог 3 ч} = f(\Delta v_{уч}^{прог 3 ч})$ (рис. 7), используемой в предлагаемом подходе.

Предлагаемая зависимость позволяет прогнозировать подсылку тяговых ресурсов в любой период суток с опережением на величину, определяемую временем подсылки:

$$t_{ij}^{доп сл} = \frac{S_{ij}^{доп сл}}{v_{уч}^{вх чет/неч}}, \quad (11)$$

где $S_{ij}^{\text{доп сл}}$ — протяженность маршрута подсылки i -й серии локомотива от станции избытка тяговых ресурсов, км.

Например, для конкретной станции стыкования родов тока С, согласно оперативным данным по подходам поездов с четного и нечетного направлений, включающим номера N_i и массы брутто $m_{\text{бр}}$ поездов, серии локомотивов M_i и их распределение по составляющим баланса тяги в заданном трехчасовом интервале, после определения нормативного резерва и захода/выхода локомотивов из ПТОЛ устанавливается, что две нитки графика в интервале остаются не обеспеченными тягой, что требует подсылки двух электровозов постоянного тока серий 2ЭС4К и 3ЭС4К. Этот результат требует проверки вследствие принятия мер по восстановлению парности тяговых ресурсов с опережением по времени на девятичасовой период, в течение которого оперативная ситуация может измениться.

При использовании прогнозного графика движения поездов для определения разности между участковыми скоростями встречных потоков поездов в заданном интервале (средняя участковая скорость входящего потока поездов четного направления — 45,6 км/ч, нечетного — 17,6 км/ч) устанавливается ее значение (27,8 км/ч), по которому с помощью полученной зависимости (рис. 7) определяется число локомотивов (3 ед.), прогнозируемых к прибытию, что подтверждает объем и возможность подсылки.

Далее с учетом соответствующих значений участковой скорости производится формирование вариантов восстановления парности с подбором опережения по времени на три-, шести-, девятичасовые периоды и оценкой возможных маршрутов подсылки со станций В и Т (таблица).

Выбор рабочего маршрута определяется по критерию минимизации времени подсылки:

$$t_{ij}^{\text{доп сл}} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Для рассматриваемого случая критерию соответствует маршрут Т—С (время подсылки 3,2 ч), по которому согласно приоритету нитки графика первым должен отправиться электровоз серии 3ЭС4К, вторым — электровоз серии 2ЭС4К.

Таблица

Варианты возможных маршрутов подсылки локомотивов резервом

Table

Possible routes for dispatching reserve locomotives

Маршрут подсылки	N_i	$m_{\text{бр}}$	M_i	$S_{ij}^{\text{доп сл}}$	$v_{\text{уч}}^{\text{вх чет}}$	$t_{ij}^{\text{доп сл}}$
В—С	91XX	8988	3ЭС4К	232	49,7	4,7
Т—С				153,8	48,1	3,2
В—С	25XX	5677	2ЭС4К	232	49,7	4,7
Т—С				153,8	48,1	3,2

Обсуждение и заключение. Применение предлагаемого подхода с использованием зависимости $\Delta M^{\text{прог 3 ч}} = f(\Delta v_{\text{уч}}^{\text{прог 3 ч}})$ позволяет повысить эффективность технологии установления баланса тяговых ресурсов на станциях стыкования родов тока путем создания механизма для обоснования объема и своевременности подсылки резервов по регулировке $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{доп сл 3 ч}}$. При этом использование инструментальной $\Delta M^{\text{прог 3 ч}} = f(\Delta v_{\text{уч}}^{\text{прог 3 ч}})$ не исключает установление баланса за счет других видов резервов ($\sum_{i=1}^n M_i^{\text{НР 3 ч}}$ и $\sum_{i=1}^n M_i^{\text{ПТОЛ 3 ч}}$).

Полученные в ходе исследования экономические оценки позволяют предположить, что эффект от применения технологии установления баланса с использованием $\Delta M^{\text{прог 3 ч}} = f(\Delta v_{\text{уч}}^{\text{прог 3 ч}})$ на одной станции стыкования родов тока в сутки составит приблизительно 170 тыс. руб., а по итогам года может достигнуть уровня 60 млн руб. В масштабе сети российских железных дорог сумма эффекта по аналогичным станциям может быть оценена примерно в 4,5 млн руб. в сутки, что в год составит более 1,6 млрд руб.

Попытки решить проблему путем оптимизации оборота локомотивов на основе автоматизированного составления графиков оборота дали положительные результаты, но не привели к окончательному решению. В условиях автоматизации построение оптимального графика оборота локомотивов на участках обращения сводится к решению задачи линейного программирования, в которой минимизируется целевая функция затрат, связанных с перецепкой. Однако преодоление многовариантности при построении оптимальных графиков оборота в условиях динамического изменения оперативной обстановки продолжает оставаться актуальной задачей. И это несмотря на использование принципа рассмотрения не всего множества возможных перецепок, а лишь небольшой его части [16].

Существует авторитетное мнение, что для решения задачи управления тяговыми ресурсами необходимо применение специальной динамической оптимизационной модели. При этом в качестве расчетного основания должна использоваться динамическая транспортная задача с задержками [17–19].

Подводя итоги, следует отметить, что предпринимаемые специалистами усилия по увязке и сопровождению графика оборота локомотивов, формированию резервов и применению технологии интервального регулирования тяговых ресурсов, казалось бы, исключают затруднения в обеспечении поездов грузового движения локомотивами. Тем не менее существует серьезная проблема установления баланса тяговых ресурсов в местах размена тяги во внутрисуточных периодах, что приводит к остановкам работы станций, неритмичности приема поездов, существенному снижению пропускной способности.

Изложенные в статье результаты не являются альтернативой развивающимся в настоящее время подходам. На основе ряда частных решений, и прежде всего доказательства наличия зависимости между колебаниями скоростей поездопотоков и величиной потребных резервов тяги, установленной для заданного размера эксплуатируемого парка, предлагается уточнить существующие модели эксплуатации локомотивного парка во внутрисуточных периодах. Это позволит не только существенно компенсировать влияние на баланс тяговых ресурсов внутрисуточной неравномерности дислокации локомотивного парка, но и в целом повысить степень его рациональной эксплуатации, усилить пропускную способность линий.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Некрасевич В.И. Использование поездных локомотивов в грузовом движении / ВНИИЖТ; БелГУТ. Гомель: БелГУТ, 2001. 269 с.
2. Nekrashevich V.I. *Use of train locomotives in freight traffic*. Gomel: BelGUT; 2001 269 p. (In Russ.).
3. Kotenko A., Kotenko O. Locomotive Team Productivity as a Criterion for Optimal Locomotive Fleet Management. In: Manakov A., Edigarian A. (eds) *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. Cham: Springer; 2022. p. 512–520. (Lecture Notes in Networks and Systems; vol 402). https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_56.
4. Мехедов М.И., Мугинштейн Л.А. Пропускная и провозная способность полигона в зависимости от тяговых ресурсов // Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических технологий: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». СПб., 2019. С. 225–238. (Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»).
5. Mehedov M.I., Muginshteyn L.A. Site throughput and carrying capacity as a function of traction resources. In: *Management of commodity flows and carriage processes on railway transport on the basis of customer orientation and logistics technologies: a joint monograph by members and scientific partners of the Joint Scientific Council of the Russian Railways*. St. Petersburg; 2019. p. 225–238. (Bulletin of the Joint Scientific Council of the Russian Railways). (In Russ.).
6. Моргунов А.И. Методические подходы к построению прогнозного графика оборота локомотивов // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформ: сб. науч. тр. М.: Интекст, 2003. С. 81–87.
7. Morgunov A.I. Methodological approaches to locomotive turnaround schedule forecasting. In: *Development of Railway Transport during Reforms: Collection of scientific articles*. Moscow: Intext Publ.; 2003. p. 81–87. (In Russ.).
8. Гордон М.А. Особенности работы систем управления движением поездов на станциях стыкования в Российской Федерации // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5, № 1. С. 62–77. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-62-77>.
9. Gordon M.A. Peculiarities of train traffic control systems at docking stations in Russia. *Transport Automation Research*. 2019;5(1):62-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-62-77>.
10. Бодриков Д.И., Воробьев А.А., Смирнов В.П., Fadeikin T.N. Simulation model of current change station operation. *Science and Technology in Transport*. 2021;(2):45-49. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vunook>.
11. Бодриков Д.И., Воробьев А.А., Смирнов В.П., Fadeikin T.N. Simulation model of current change station operation. *Science and Technology in Transport*. 2021;(2):45-49. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vunook>.
12. Тяговое обеспечение поездной работы при изменениях оперативной обстановки / Е.О. Дмитриев [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 2 (86). С. 58–66. EDN: <https://www.elibrary.ru/kynndt>.
13. Dmitriyev E.O., Sukhov A.A., Petrov A.S., Alekseyevnin E.A. Traction support of train operation during changes in operational situation. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2021;(2):58-66. (In Russ.) EDN: <https://www.elibrary.ru/kynndt>.
14. Осипов Н.И. Применение имитационного моделирования для оценки влияния величины интервала прибытия поездов на работу станций стыкования родов тягового тока // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 16–22. https://doi.org/10.52170/2712-9195_2022_4_16.
15. Osipov N.I. Simulation modelling to estimate the influence of the trains arrival interval on the work of traction current junction stations. *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy transporta*. 2022;(4):16-22. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/2712-9195_2022_4_16.
16. Имитационная модель определения рациональных размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота / Е.А. Сотников [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 3. С. 157–164. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>.
17. Sotnikov E.A., Gonik M.M., Khomyakov S.V., Mikhaylov S.V. Simulation model for determining the rational dimensions of the irreducible reserve of locomotives at the stations of its turnover. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(3):157-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>.
18. Нормирование размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота / Е.А. Сотников [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-3-8>.
19. Sotnikov E.A., Gonik M.M., Khomyakov S.V., Mikhaylov S.V. Rationing the size of the irreducible reserve of locomotives at the turnover stations. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(1):3-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-3-8>.
20. Кувондилов Ж.О., Цаплин А.Е. Методика анализа и математическая модель функции готовности локомотивного парка с учетом холодного резерва // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, вып. 4. С. 631–641. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-4-631-641>.
21. Kuvondikov J.O., Tsaplin A.E. Method of analysis and simulation model of locomotive fleet availability function accounting for cold standby reserve. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019;16(4):631-641. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-4-631-641>.
22. Мачерет Д.А. Анализ долгосрочной динамики скоростей в грузовом движении // Железнодорожный транспорт. 2012. № 5. С. 66–71. EDN: <https://www.elibrary.ru/nlbijm>.
23. Macheret D.A. Analysis of long-term trends of speeds in freight traffic. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2012;(5):66-71. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/nlbijm>.
24. Коробейников А.П., Стародубцева В.А. Анализ эффективности работы станций стыкования // Научные горизонты. 2022. № 4 (56). С. 55–59. EDN: <https://www.elibrary.ru/vtclldj>.

Korobeynikov A. P., Starodubtseva V. A. Analysis of the efficiency of docking stations. *Cientific Horizons*. 2022;(4):55-59. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vtcljdj>.

14. Серегин И. В., Немцов Ю. В. Определение оптимальных маршрутов следования поездов повышенной массы и длины при наличии лимитирующих участков железнодорожной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 4 (100). С. 88–94. EDN: <https://www.elibrary.ru/efypll>.

Seregin I. V., Nemtsov Yu. V. Determination of optimal routes of weighted and lengthened trains with limiting sections of the railway network. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2023;(4):88-94. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/efypll>.

15. Мехедов М. И., Корниенко Н. В. Влияние технического и технологического оснащения пункта технического обслуживания локомотивов на пропускную способность железнодорожной линии // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 4. С. 225–232. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-225-232>.

Mekhedov M. I., Kornienko N. V. Influence of technical and technological equipment of a locomotive maintenance point on the capacity of a railway line. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(4):225-232. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-225-232>.

16. Максимов Д. В. Автоматизация составления графика оборота локомотивов // Труды ВНИИЖТ. М., 1980. Вып. 633. С. 86–96.

Maksimov D. V. Automation of locomotives turnaround scheduling. *Proceedings of the Railway Research Institute*. Moscow; 1980. Issue. 633. p. 86–96. (In Russ.).

17. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Проблема оптимизации оборота поездных локомотивов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2016. № 3. С. 80–89. EDN: <https://www.elibrary.ru/wvpnpd>.

Kozlov P. A., Vakulenko S. P. Train locomotive turnaround optimization issue. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey so-obshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2016;(3):80-89. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/wvpnpd>.

18. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Расчет согласованных режимов оборота локомотивов и технического обслуживания // Наука и техника транспорта. 2016. № 3. С. 90–95. EDN: <https://www.elibrary.ru/wmvaxl>.

Kozlov P. A., Vakulenko S. P. Calculation of agreed locomotive turnaround and maintenance modes. *Science and Technology in Transport*. 2016;(3):90-95. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/wmvaxl>.

19. Козлов П. А., Вакуленко С. П. Модель оптимального графика оборота поездных локомотивов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2015. № 2. С. 15–20. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2015-0-2-15-20>.

Kozlov P. A., Vakulenko S. P. Simulation Model to Optimize Turnover Schedule for Train Locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2015;(2):15-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2015-0-2-15-20>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наталья Владимировна КОРНИЕНКО, ведущий технолог, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (НЦ «ЦМПЭ»), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

Михаил Иванович МЕХЕДОВ, канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Алексей Геннадьевич КОТЕНКО, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 759781, <https://orcid.org/0000-0003-1638-9965>, Author ID (SCOPUS): 57194491163, Researcher ID (WoS): AGC-1482-2022

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya V. KORNIENKO, Leading Technologist, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

Mikhail I. MEKHEDOV, Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director, Director of the Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Alexey G. KOTENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 759781, <https://orcid.org/0000-0003-1638-9965>, Author ID (SCOPUS): 57194491163, Researcher ID (WoS): AGC-1482-2022

ВКЛАД АВТОРОВ

Наталья Владимировна КОРНИЕНКО. Формулировка цели, новизны, методологии исследования, подготовка и анализ исходных данных, описание материалов, выводы (35%).

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Формирование направления исследовательской деятельности (30%).

Алексей Геннадьевич КОТЕНКО. Формулировка цели, новизны, методологии исследования, подготовка и анализ исходных данных, описание материалов, выводы (35%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Natalya V. KORNIENKO. Setting the goal, novelty, research methodology, preparation and analysis of initial data, description of materials, conclusions (35%).

Mikhail I. MEKHEDOV. Formation of the line of research (30%).

Alexey G. KOTENKO. Setting the goal, novelty, research methodology, preparation and analysis of initial data, description of materials, conclusions (35%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 05.07.2024, рецензия от первого рецензента получена 22.07.2024, рецензия от второго рецензента получена 29.07.2024, принята к публикации 08.08.2024.

The article was submitted 05.07.2024, first review received 22.07.2024, second review received 29.07.2024, accepted for publication 08.08.2024.