CC BY 4.0

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья
УДК 656.222.4
EDN: https://elibrary.ru/rxclkz

Планирование работы машинистов городского рельсового транспорта

А. В. Маркевич[1], В. Г. Сидоренко[2]✉

[1] Терралинк Девелопмент,
Москва, Российская Федерация
[2] Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена обобщению опыта решения задач планирования работы машинистов городского рельсового транспорта, результаты которого оказывают существенное влияние на безопасность движения. Целью исследования является выявление общих черт в подходах к планированию работы производственных и человеческих ресурсов городского рельсового транспорта; анализ результатов, достигнутых в планировании работы машинистов; определение направления расширения сферы применения и дальнейших исследований, связанных с комбинированием различных методов при решении задач планирования.
Материалы и методы. Объектом исследования является математическое обеспечение элементов интеллектуальных транспортных систем, связанных с планированием работы машинистов. Для формализации задачи построения графиков работы машинистов введено описание результатов построения в формате кортежей, т. е. последовательностей компонентов.
Результаты. Анализ опыта создания сценариев управления различными видами ресурсов (производственными и человеческими) позволил выявить единство постановок задач и подходов к их решению при повышении комфортности получения транспортных услуг и условий работы людей, чему уделяется существенное внимание на этапе планирования перевозочного процесса. Проанализированы результаты функционирования созданных авторами систем, которые являются составными частями интеллектуальных транспортных систем, и достигаемые при этом эффекты. Предложен новый для отечественных железных дорог подход к формализации задачи планирования работы машинистов, иллюстрирующий предложенную классификацию задач планирования и позволяющий объединить результаты построения графиков работы машинистов, выполняющих разные типы работ. Показана возможность применения метода динамического программирования Беллмана и генетического алгоритма к решению поставленной задачи. Выполнена статистическая обработка полученных данных. Выявлены предпосылки для создания единой методологии интеллектуализации планирования работы ресурсов разных типов на городском рельсовом транспорте.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы и при формировании графиков работы локомотивных бригад, например, для условий Московского центрального кольца, при дополнении существующей модели. Использование разработанных алгоритмов позволяет улучшить показатели равномерности автоматически построенных графиков работ по сравнению с построенными вручную применительно к реальным транспортным системам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллектуальные транспортные системы, критерии качества управления, планирование, локомотивные бригады, машинист, электроподвижной состав, график движения поездов, равномерность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркевич А. В., Сидоренко В. Г. Планирование работы машинистов городского рельсового транспорта // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 259–269.

✉ valenfalk@mail.ru (В. Г. Сидоренко)

© Маркевич А. В., Сидоренко В. Г., 2024

CC BY 4.0

Original article
UDK 656.222.4
EDN: https://elibrary.ru/rxclkz

Urban railway driver scheduling

Agata V. Markevich[1], Valentina G. Sidorenko[2] ✉

[1] Terralink Development,
Moscow, Russian Federation
[2] Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article summarises the experience of urban railway driver scheduling with a significant impact on traffic safety. The study is intended to identify commonalities in the scheduling of production and human resources in urban railways to analyse the results achieved in driver scheduling; to identify further research and applications related to the combination of different scheduling methods.
Materials and methods. The object of research is mathematical support of elements of smart transport systems related to driver scheduling. The formalisation of driver scheduling required a description of construction results in the format of suites, i. e. component sequences.
Results. The analysis of resource management scenarios (production and human) has revealed the unity of problem statements and approaches to their solution while improving the comfort of transport services and peoples working conditions, which is given considerable attention at the stage of transport scheduling. The paper analyses the functioning of the systems created by the authors, which systems are part of smart transport systems, and the effects achieved. The paper proposes a new, for Russian railways, way to formalise driver scheduling, illustrating the proposed classification of scheduling tasks and combining the scheduling results for drivers performing different types of work. The article shows possible application of the Bellman dynamic programming method and genetic algorithm to the solution of the problem. The article provides statistical processing of the obtained data. The paper identifies prerequisites for creating a unified methodology for smart scheduling of different types of resources on urban railways.
Discussion and conclusion. The results can also be used in scheduling locomotive crews, for example, for the Moscow Central Ring, with the existing model expanded. The algorithms produce automatic schedules more balanced than manual schedules with respect to real transport systems.

KEYWORDS: smart transport systems, management quality criteria, scheduling, locomotive crews, driver, electric rolling stock, train schedule, uniformity

FOR CITATION: Markevich A. V., Sidorenko V. G. Urban railway driver scheduling. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):259-269. (In Russ.).

✉ valenfalk@mail.ru (V. G. Sidorenko)

© Markevich A. V., Sidorenko V. G., 2024

Введение. Для мегаполисов и крупных городских агломераций характерна тенденция сращивания систем городского рельсового транспорта (метрополитен, легкое метро, трамвай, монорельс) и пригородного железнодорожного транспорта, объединение их в единую транспортную систему, к которой предъявляются единые требования по безопасности, интенсивности и комфортности движения [1–4]. В нашей стране лидером в этом направлении является Москва, но и в других городах-миллионниках прослеживается это направление развития транспортной инфраструктуры. Примером могут служить Нижегородская и Екатеринбургская агломерации. Необходимость выполнения единых требований определяет потребность в использовании опыта, накопленного для одного вида транспорта и для других, с которыми этот вид транспорта интегрируется. При создании элементов интеллектуальных транспортных систем для Московского центрального кольца (МЦК) и Московских центральных диаметров (МЦД) широко применяется опыт, накопленный при решении аналогичных задач для метрополитена. Обеспечения заданного уровня мобильности населения, максимизации показателей использования транспортной инфраструктуры, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для работников и пользователей транспорта возможно достичь путем автоматизированного поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления на основе использования комбинации различных методов управления, оптимизации и машинного обучения. Предотвращение инцидентов безопасности на транспорте напрямую зависит от того, насколько качественно выполнено планирование транспортных процессов. Устойчивость составленных планов и графиков к различным внешним возмущениям позволит минимизировать потери в случае возникновения различных сбойных ситуаций или инцидентов безопасности [5].

Цель данной статьи — показать необходимость и возможность комбинирования различных методов решения задач управления на разных этапах решения задачи построения графика работы (ГР) машинистов городского рельсового транспорта, а также показать еще одну область применения для МЦК опыта, накопленного на метрополитене.

При решении задач управления можно выявить единство подходов к планированию функционирования как человеческих ресурсов, так и подвижного состава и составлению трех тесно связанных между собой технологических документов, регламентирующих организацию эксплуатационной работы (рис. 1):

- график движения поездов (ГДП);
- график оборота подвижного состава;
- график работы локомотивных бригад.

В документах всех трех типов прослеживается единство условных обозначений и принципов построения, выбранных критериев качества графика (рис. 1). Стоит отметить, что общность подходов к решению задач управления находит отражение в том, что рациональное построение каждого из графиков дает широкий спектр положительных эффектов, которые пересекаются между собой и усиливаются. При составлении схемы авторами учтен принятый в ОАО «РЖД» подход к оценке эффективности работ плана научно-технического развития. Это нашло подтверждение в ходе создания и широкой эксплуатации на Московском метрополитене и адаптации к условиям МЦК таких систем, как автоматизированная система построения планового графика движения поездов [6] и интеллектуальная система построения ГР машинистов [7].

Результаты решения задачи обеспечения равномерности интервалов движения поездов при построении ГДП представлены в работе [8], а равномерности проведения технического обслуживания подвижного состава при построении графика оборота подвижного состава в работе [9]. В работах [10–16] рассматриваются вопросы построения графика работы локомотивных бригад для пригородного и дальнего сообщения, условия организации работы на которых отличаются от условий на городском рельсовом транспорте. Зарубежные авторы также обращаются в своих работах к данной теме [17–21]. Вопросы равномерности распределения работ в указанных статьях не рассматриваются. В данной статье рассмотрено решение задачи обеспечения равномерности загрузки локомотивных бригад на примере работы машинистов городского рельсового транспорта. К системам городского рельсового транспорта относятся МЦК, МЦД и метрополитен.

В случае когда управление подвижным составом осуществляется только машинистом, без участия помощника, как это реализовано в настоящее время на Московском метрополитене, локомотивная бригада состоит только из машиниста, и задача построения графика работы локомотивных бригад сводится к задаче построения ГР машинистов. В случае когда управление подвижным составом осуществляется машинистом совместно с помощником, процесс построения графика работы локомотивных бригад может быть проведен в два этапа. Сначала выполняется построение ГР машинистов, а затем с учетом особенностей формирования локомотивной бригады (например, психологической совместимости машинистов и помощников) ГР помощников. Алгоритмы построения обоих ГР схожи, различаются ограничения. При этом процесс построения графика работы локомотивных бригад может носить итерационный характер.

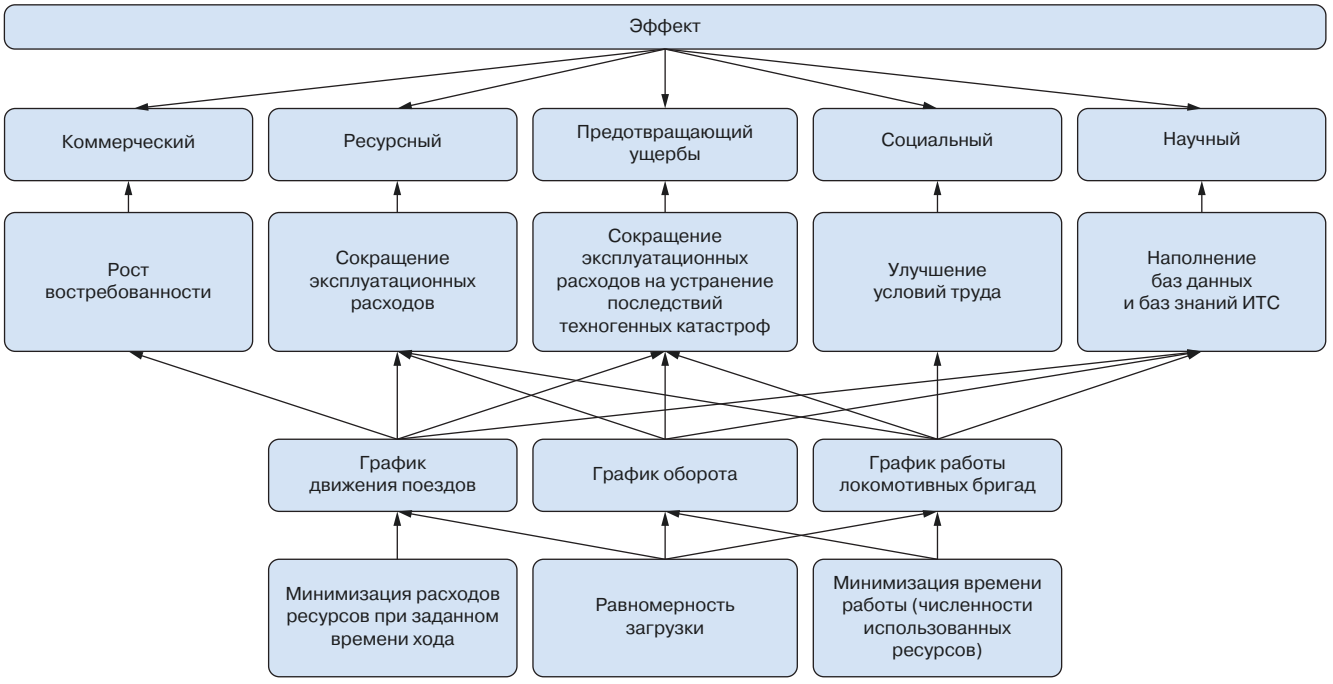

Рис. 1. Единство подходов к определению эффективности результатов планирования

Fig. 1. Unity of approaches to determining scheduling efficiency

Материалы и методы. Анализ технологических процессов Московского метрополитена и МЦК показал, что существует три типа работ, которые выполняют машинисты, непосредственно задействованные в организации пассажирского движения. Это позволило выделить три рассматриваемых «типа» машинистов:

• поездные (основные) – управляющие одним и тем же составом в течение длительного времени внутри рабочей смены;

• маневровые – осуществляющие маневровые перемещения состава при смене направления движения;

• подменные – управляющие составами во время обеденных перерывов поездных и маневровых машинистов.

Пример объединения этих работ представлен на рис. 2 в формате графика оборота, принятом на Московском метрополитене, с нанесенной на него разбивкой по основным рабочим сменам (РС) и подменным рабочим интервалам (РИ). На рисунке проиллюстрирован принцип объединения ГР основных и подменных машинистов с учетом времени проезда до станции осуществления подмены. В ситуации 1 основной машинист № 4 маршрута 4 прежде чем начать работу основным машинистом, осуществляет подмену машиниста № 2 на маршруте 7. В ситуации 2 машинист № 2 маршрута 11 осуществляет подмену дважды: до работы основным машинистом подменяет машиниста № 1 на маршруте 21, а после — машиниста № 4 на маршруте 22. В ситуации 3 машинист № 3 маршрута 21 прежде чем начать работу основным машинистом, осуществляет подмену машиниста № 4 на маршруте 38. При этом допустимая длительность суммарной РС не превышается. Длительность основных РС рассчитывается с учетом времени приемки и сдачи подвижного состава, что отражено на рис. 2. Высота изображений интервалов работы машинистов различна: в начале основной РС и подменного РИ изображение выше, чем в середине, что соответствует режиму приемки, а в конце — ниже, что соответствует сдаче. Средняя часть изображения соответствует непосредственно движению. Длительность интервалов времени приемки-сдачи определяется правилами приемки и сдачи подвижного состава в зависимости от места нахождения состава. Данные получены с использованием созданной авторами интеллектуальной системы построения ГР машинистов [7].

Для формализации задачи построения ГР машинистов авторами по аналогии с показавшими свою эффективность при построении ГДП и графика оборота формализациями введено описание результатов построения ГР машинистов в формате кортежей (последовательностей компонентов) [5]. Введено понятие «работа» A — это кортеж, включающий в себя следующие компоненты (поля):

• S — состав, на котором проводится работа;

• T — тип работы (основной, подменный или маневровый машинист, простой);

• L — длительность выполнения работы;

• t_b — момент времени начала выполнения работ с указанием суток;

• W — машинист, выполняющий работу;

• C — стоимость выполнения работ, которая зависит от значений перечисленных выше полей рассматриваемого кортежа.

Компоненты S, T, L, t_b являются константами в рамках решения задачи построения ГР машинистов, значения которых определены результатами решения задачи построения ГДП и графика оборота, разбиением их на РС и РИ. Значения компонентов W и C определяются в результате решения задачи построения ГР машинистов. Значение компонента C является функцией остальных полей кортежа.

Совокупность всех работ всех типов A описывает ГР машинистов.

При использовании введенной формализации критерий качества R_T ГР машинистов, позволяющий минимизировать финансовые затраты на оплату труда машинистов при выполнении заданных ГДП и графика оборота, сформулируем следующим образом:

$$R_T = \sum_{a=1}^{N_A} (A_a : C \cdot A_a : L) \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где N_A — количество работ всех типов для всех составов, которые надо выполнить для реализации заданных ГДП и графика оборота; a — индекс работы из рассматриваемого множества, параметр суммирования; A_a — работа с индексом a.

Ограничениями при решении этой задачи являются:

• требования выполнения всех работ всех N_T типов на всех N_M составах имеющимся множеством машинистов:

$$\forall A, 0 < A : W \le I_W,$$

где I_W — число задействованных машинистов;

• отсутствие одновременного назначения на выполнение одной и той же работы более одного машиниста, что недопустимо на уровне введенной формализации;

• отсутствие назначения одному машинисту более одной работы в один и тот же момент времени:

$$\forall 0 < a,b \le N_A,\ A_a : W \ne A_b : W,$$

где b — индекс работы из рассматриваемого множества; A_b — работа с индексом b;

• требования Трудового кодекса РФ, Положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников конкретного транспортного предприятия, ГДП и графика оборота [7, 22]. В указанных статьях приведены математические выражения, формализующие следующие учитываемые ограничения:

– работа в течение двух смен подряд запрещается;

– рабочий день может быть разделен на части, чтобы общая продолжительность рабочего времени

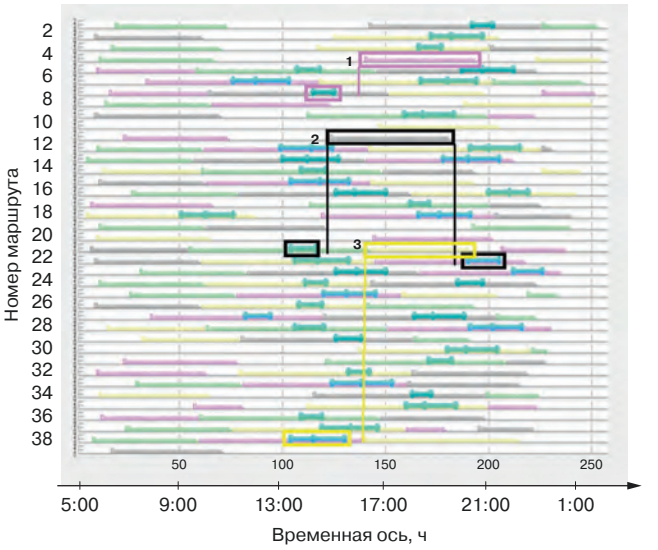

Рис. 2. Примеры объединения работ различных типов в одном ГР машинистов:
зеленым цветом обозначены интервалы работы основного машиниста № 1; черным — № 2; желтым — № 3; розовым — № 4. Голубым цветом указаны возможности для осуществления подмен

Fig. 2. Examples of different work types combined in a single driver schedule:
green colour indicates work intervals of Main Driver 1; black — No. 2; yellow — No. 3; pink — No. 4. Light blue shows potential substitutions

не превышала установленной продолжительности ежедневной работы;

– ограничение на максимальную продолжительность рабочего времени в течение недели или месяца;

– в течение рабочего дня (смены), через 3–4,5 ч после начала работы, не в первые 30 мин работы, работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более 2 ч и не менее 30 мин;

– продолжительность еженедельного непрерывного отдыха не может быть менее 42 ч;

– в нерабочие праздничные дни допускается производство работ, приостановка которых невозможна по производственно-техническим условиям работ, вызываемых необходимостью обслуживания населения;

– ограничение на максимальное количество рабочих часов в день при работе в течение одной смены или при работе в течение двух смен, а также на продолжительность выполнения конкретных работ (например, работы в качестве основного, подменного или маневрового машиниста);

– нельзя устанавливать более двух смен подряд, охватывающих ночной промежуток времени (для метрополитена и МЦК это различные временные периоды, определяемые особенностями организации перевозочного процесса) по местному времени;

– продолжительность отдыха в течение суток должна превышать длительность рабочего дня накануне

не менее чем в два раза и не может быть менее заданной величины (например, для метрополитена это 12 ч);

– число выходных дней должно быть не менее числа воскресных дней в отчетном периоде;

– машинисты могут консолидировать отдых и использовать его единовременно, но только за две недели;

– при работе ночью в две смены перерыв между ними должен быть более заданной величины.

Логика ограничений при переходе от одной транспортной системы к другой не меняется. Меняются числовые параметры, отражающие особенности организации режима рабочего времени и времени отдыха работников конкретного транспортного предприятия, что учитывается путем изменения соответствующих настроек интеллектуальной системы построения ГР машинистов. Необходимость учета тех или иных ограничений тоже отражается в изменении соответствующих настроек интеллектуальной системы построения ГР машинистов [7]. Явочная численность локомотивных бригад с учетом их возможных отвлечений (больничные, обучение и т. д.) учитывается путем введения соответствующих ограничений на интервалы времени, когда работники могут быть задействованы в реализации заданного графика оборота. Отвлечения, привлечение резервных сотрудников на случай нестандартных ситуаций или отказов технических средств может рассматриваться как еще один тип работ, который также должен учитываться. В рамках данной работы это не освещается, так как рассматривается задача определения занятости сотрудников в реализации заданного ГДП и графика оборота, но разработанное математическое обеспечение позволяет реализовать данное расширение.

Для иллюстрации способа формализации учитываемых ограничений рассмотрим формализацию ограничения на максимальную продолжительность рабочего времени в течение недели или месяца:

$$\sum_{d=1}^{D}\sum_{a=1}^{N_A}\left(A_a : L\left|\left(\left(A_a : W = m\right) \text{ и } \left(A_a : t_b \in d\right)\right)\right.\right) \le T_{\max}, \quad m = 1, \ldots, I_W, \tag{2}$$

где $T_{\max}$ — максимальная продолжительность рабочего времени в течение заданного периода времени (недели или месяца); D — количество дней в периоде времени (неделе или месяце), для которого задана максимальная продолжительность рабочего времени $T_{\max}$; $d = 1, \ldots, D$ — номер дня в периоде времени (неделе или месяце), для которого задана максимальная продолжительность рабочего времени $T_{\max}$.

Решение этой задачи возможно с использованием, например, генетического алгоритма [23] при условии, что предварительно сформирована база данных вариантов ГР машинистов отдельно для каждого типа работ. В этом случае один из вариантов построения хромосом предполагает следующее:

• множество аллелей (значений, которые может принимать ген) одного из генов имеет мощность, равную числу вариантов ГР основных машинистов; этот ген соответствует всему варианту целиком, значение аллеля идентифицирует этот вариант;

• каждому из обеденных перерывов или какой-то их группе, которые отстоят друг от друга менее чем на заданный промежуток времени, соответствует отдельный ген;

• аналогично для группы маневровых работ.

Формирование подмножества работ, у которых компонент T имеет значение, соответствующее работе в качестве основного машиниста, происходит при автоматизированном построении ГР основных машинистов. В результате формируется база данных вариантов ГР этого типа, рассматриваемых генетическим алгоритмом в ходе решения задачи построения объединенного ГР машинистов с использованием критерия (1). При автоматизированном построении ГР основных машинистов в качестве критерия оптимальности используется критерий равномерности назначения (загрузки) основных машинистов на сформированное расписание РИ $R_M\left(x_1, \ldots, x_N\right)$, который формализуется следующим образом:

$$R_M\left(x_1, \ldots, x_N\right) = \sum_{i=1}^{I_{MW}}\left[\sum_{k=1}^{N}\left(f_{Mk} \middle| x_k = i\right)\right]^2, \tag{3}$$

где $i = 1, \ldots, I_{MW}$ — возможные значения номера основного машиниста из результирующего множества машинистов, задействованных в качестве основных (M_{MW}); I_{MW} — число задействованных основных машинистов, мощность множества M_{MW} (подмножество множества всех задействованных машинистов с мощностью I_W); N — число РИ, на которые разбит весь график оборота; f_{Mk} — вес ребра, соответствующего назначению выбранного основного машиниста на k-й РИ, равный длительности РИ; x_k — номер основного машиниста, задействованного для реализации k-го РИ.

Решение задачи назначения основных машинистов на сформированное расписание РИ можно выполнить, используя метод динамического программирования, где на k-м этапе решения важно не только то, как были реализованы предыдущие (k — 1) РИ, но и сколько машинистов для этого было задействовано и насколько равномерно. При использовании равного числа машинистов для всех решений выбирается тот вариант, который обеспечивает минимум текущего значения критерия (3):

$$R_{Mk_j}\left(x_1^j, \ldots, x_k^j\right) = \min_{j=1,\ldots,J_{k-1}}\left[\Delta R_{Mk_j}\left(x_k^j\right) + R_{M(k-1)_j}\left(x_1^j, \ldots, x_{k-1}^j\right)\right], k = 2, \ldots, N, \tag{4}$$

где $R_{Mk_j}\left(x_1^j, \ldots, x_k^j\right)$ — значение критерия оптимальности после выполнения назначений на текущий k-й РИ j-м способом; $\Delta R_{Mk_j}\left(x_k^j\right)$ — приращение значения

критерия оптимальности после выполнения назначений на текущий k-й РИ j-м способом при заданном способе назначений на предыдущие (k — 1) РИ; $x_1^j, ..., x_k^j$ — номера машинистов, задействованных для реализации k РИ j-м способом, если ввести соответствие между формулами (1) и (4) и считать, что в формуле (1) значение a, равное единице, соответствует работам основных машинистов; J_k — число вариантов решения задачи на k-м этапе.

Определим значение $\Delta R_{Mk}(x_k)$:

$$\Delta R_{Mk}(x_k) = R_{Mk}(x_1,\ldots,x_k) - R_{M(k-1)}(x_1,\ldots,x_{k-1}) =$$
$$= R_{Mk}(x_1,\ldots,x_k) - R_{M(k-1)}(x_1,\ldots,x_{k-1},x_k=0) =$$
$$= \sum_{i=1}^{I_{MW}}\left[\sum_{n=1}^{k}(f_{Mn}|x_n=i)\right]^2 - \sum_{i=1}^{I_{MW}}\left[\sum_{n=1}^{k-1}(f_{Mn}|x_n=i)\right]^2 =$$
$$= \sum_{i=1}^{I_{MW}}\left\{\left[\sum_{n=1}^{k}(f_{Mn}|x_n=i)\right]^2 - \left[\sum_{n=1}^{k-1}(f_{Mn}|x_n=i)\right]^2\right\} =$$
$$= \sum_{i=1}^{I_{MW}}\left\{\left[\sum_{n=1}^{k}(f_{Mn}|x_n=i) - \sum_{n=1}^{k-1}(f_{Mn}|x_n=i)\right]\left[\sum_{n=1}^{k}(f_{Mn}|x_n=i) + \sum_{n=1}^{k-1}(f_{Mn}|x_n=i)\right]\right\} = \sum_{i=1}^{I_{MW}}\left\{(f_{Mk}|x_k=i)\times\right.$$
$$\left.\times\left[\sum_{n=1}^{k-1}2(f_{Mn}|x_n=i) + (f_{Mk}|x_k=i)\right]\right\}, \qquad (5)$$

где f_{Mn} — вес ребра, соответствующего назначению выбранного основного машиниста на n-й РИ, равный длительности РИ; x_n — номер основного машиниста, задействованного для реализации n-го РИ.

Полученное выражение позволяет проводить рекуррентное вычисление критерия оптимальности $R_M(x_1,...,x_N)$ на каждом последующем этапе решения задачи с использованием ранее вычисленных значений суммарных продолжительностей всех РС каждого из машинистов.

На первом этапе решения задачи $R_{M1}(x_1=1)$ существует только один вариант назначения машинистов. С учетом проверки условий возможности добавления нового РИ уже задействованным машинистам на нескольких следующих этапах, число которых не превышает результирующее количество задействованных для реализации заданного графика оборота машинистов, может отсутствовать ветвление.

Каждый j-й способ реализации назначения машинистов на k-м этапе отличается значением переменной x_k и числом ее возможных значений (текущей мощностью множества M_{MW}). Для уменьшения числа перебираемых вариантов могут использоваться и дополнительные условия. Например, рассмотрение из нескольких способов, при которых каждый из машинистов к k-му этапу имеет одно и то же количество РИ, выбор из рассмотренных только того, который обеспечивает минимум текущего значения критерия оптимальности.

Выражение (4) используется для выполнения обратного хода метода динамического программирования для восстановления пути оптимального решения задачи.

Результаты исследования. Рассмотрим результаты, полученные с использованием разработанного авторами подхода к составлению ГР основных машинистов, при котором применяются выражения (3), (4), (5). Использование критериев равномерности чередования рабочего времени и времени отдыха при построении ГР машинистов (рис. 3) позволяет получить более равномерное распределение рабочих смен по сравнению с реализуемыми на практике (рис. 4). Для определения показателей учитывались 7 дней, следующих за текущим. Линией красного цвета изображен уровень среднего значения показателя за весь период наблюдения. Представленные на рис. 3 и 4 значения среднеквадратического отклонения (СКО) и размаха (разности между наибольшим и наименьшим значениями, представленными на графике) подтверждают повышение равномерности.

Подход к решению задачи повышения эффективности использования рабочего времени подменных и маневровых машинистов схож с рассмотренным.

Полученные выражения позволяют уменьшать количество рассматриваемых вариантов при решении оптимизационных задач, повышать скорость поиска решений и объединять в единый график выполнения работ различных типов на основе критерия (1).

Полученные результаты могут быть использованы и при формировании графика работы локомотивных бригад, например, для условий МЦК при дополнении существующей модели ограничениями, связанными с необходимостью обеспечить допустимое комплектование локомотивных бригад [7].

Рассмотрим подробнее пути получения эффекта от использования разработанных на кафедре управления и защиты информации РУТ (МИИТ) элементов интеллектуальных транспортных систем, функционирование которых связано с комплексным автоматизированным построением ГДП, графика оборота и графика работы локомотивных бригад для городского рельсового транспорта, к которому в Москве относятся не только метрополитен, но МЦК и МЦД. Интегрировать полученные результаты в части математического обеспечения в уже использующиеся программные средства планирования работы можно путем создания соответствующих программных модулей, совместимых по форматам данных с эксплуатируемыми.

Коммерческий эффект связан с ростом востребованности транспортных систем в случае сокращения межпоездных интервалов, повышения безопасности движения и комфорта, что напрямую связано с соблюдением равномерности движения и использования ресурсов.

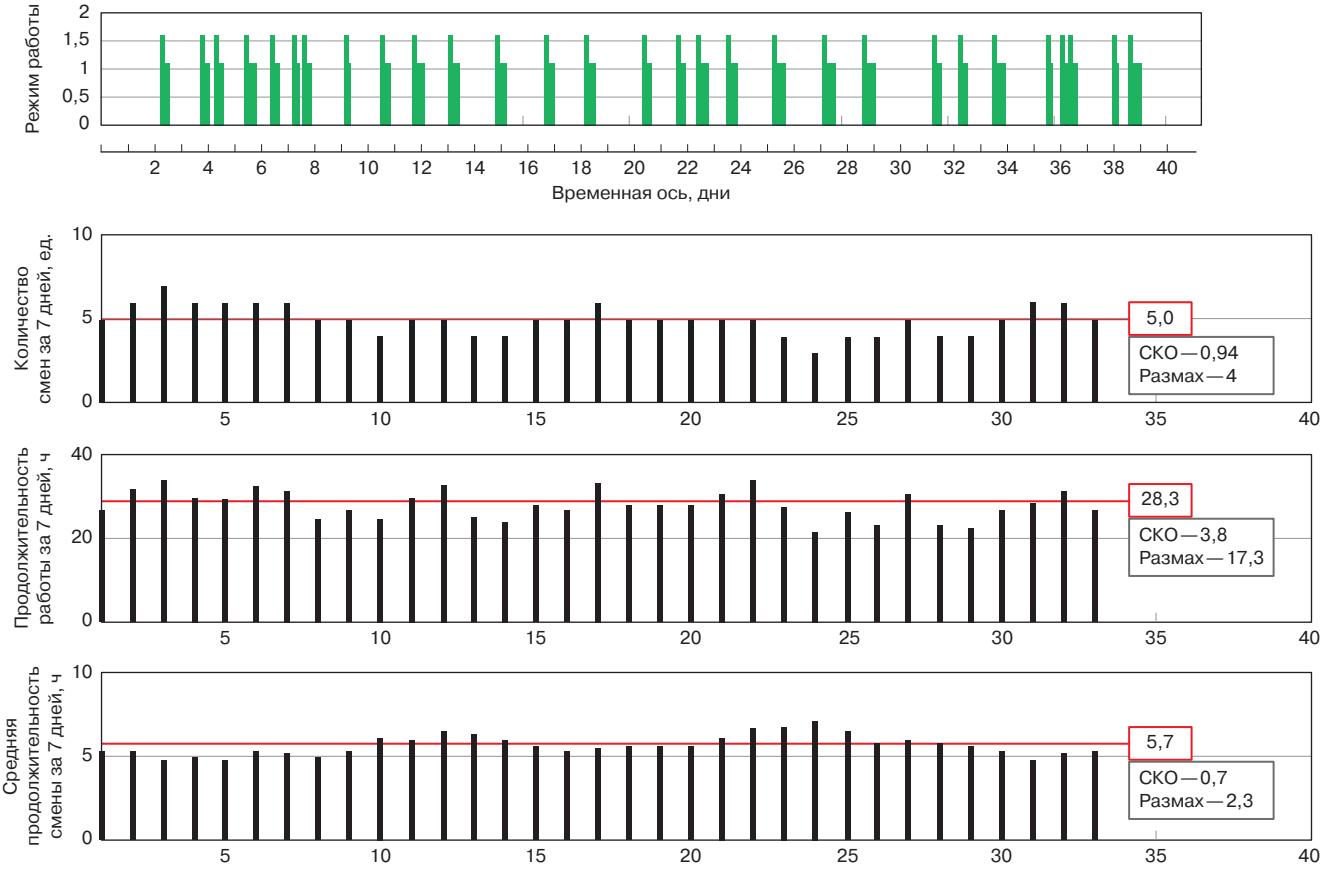

Рис. 3. Примеры графика работы машиниста, построенного с учетом критерия равномерности

Fig. 3. Examples of a driver schedule built according to the uniformity criterion

Ресурсный эффект от внедрения средств автоматизации планирования определяется сокращением связанных с порожним пробегом составов эксплуатационных расходов, вызванных дополнительным расходом электроэнергии на тягу и потребностью в дополнительных локомотивных бригадах. Согласно выполненной оценке, использование разработанной интеллектуальной системы построения графика работы локомотивных бригад поможет сократить потребность в трудовых ресурсах при формировании ГР машинистов на 20–25 %. Одновременно повысится производительность труда сотрудников, решающих задачи планирования, так как внедрение интеллектуальной системы позволит сократить время, затрачиваемое на построение графика работы локомотивных бригад, с дней до часов.

Предотвращающий ущербы эффект определяется сокращением эксплуатационных расходов на устранение последствий техногенных катастроф, вероятность наступления которых повышается при неустойчивом характере плановых графиков.

Социальный эффект во многом определяется улучшением условий труда, к которым относится соблюдение особенностей режима рабочего времени и времени отдыха локомотивных бригад, в первую очередь связанных с организацией работы в ночное время, которая, как показано в [5, 24], оказывает существенное влияние на безаварийность движения, а следовательно, способствует получению предотвращающего ущербы эффекта.

Научный эффект связан с тем, что на основе выполненного обобщающего анализа накопленного опыта и выявления общих черт процессов планирования, реализуемых применительно к различным видам ресурсов, возможно выделение и построение шаблонов проектирования программного обеспечения соответствующих интеллектуальных систем. Одновременно в ходе сбора данных и выполнения экспериментов происходит наполнение баз данных и баз знаний интеллектуальных транспортных систем [4–9, 22–25].

Определенные в работе критерии качества управления нацелены на получение перечисленных эффектов от внедрения соответствующих интеллектуальных систем. Критерий минимизации расхода ресурсов при заданном времени хода способствует обеспечению пунктуальности перевозок, не допуская неоправданного расхода ресурсов, т. е. в первую очередь позволяет обеспечить коммерческий и предотвращающий ущербы

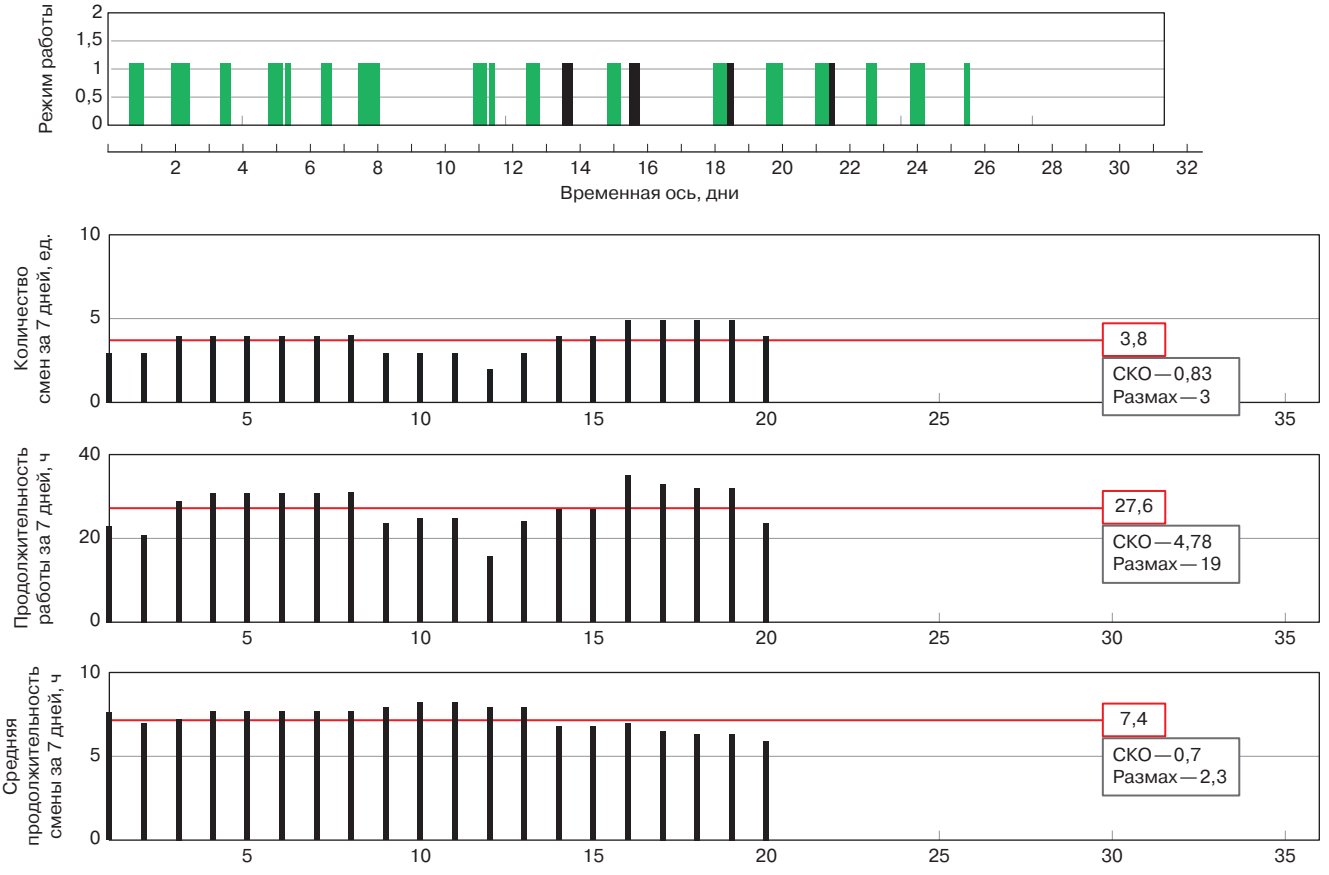

Рис. 4. Фрагмент реального графика работы машиниста

Fig. 4. Fragment of a real driver schedule

эффекты [26]. Равномерность загрузки, как отмечалось выше, способствует получению всех видов эффекта. Минимизация времени работы или размера использованных ресурсов позволяет достичь ресурсного эффекта.

Обсуждение и заключение. Проанализирован опыт, накопленный авторами в ходе создания интеллектуальных систем планирования на городском рельсовом транспорте. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

• Выявлены общие и отличительные черты производственных и человеческих ресурсов разных классов с точки зрения задач планирования, что позволило интегрировать результаты практического использования известных авторам интеллектуальных систем планирования.

• Выявлены единство критериев качества управления для ресурсов разных типов и подходов к формализации и решению соответствующих задач управления, а также особенности этих требований в зависимости от класса управляемого объекта, что позволит организовать процессы планирования функционирования различных объектов в едином пространстве методов решения задач с учетом наличия взаимосвязи между ними.

• Представлены результаты, подтверждающие применимость предложенных и реализованных авторами подходов к решению поставленных задач.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что в совокупности с ранее полученными они могут стать основой единой методологии создания и развития мощного множества интеллектуальных транспортных систем, позволят создать инструменты, облегчающие разработку подобных систем, задающие их типовую структуру (фреймворк), и множество шаблонов проектирования программного обеспечения таких систем. Подобные проекты имеют фундаментальный характер и являются примером проектирования систем от частного к общему.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

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. Троицкая Н. А., Титова С. С. Интеграция Московского центрального кольца и центральных диаметров в транспортную систему столицы // Транспортное строительство. 2023. № 1. С. 2–5. EDN: https://elibrary.ru/maqpwr.

Troitskaya N. A., Titova S. S. Integration of the Moscow Central Ring and central diameters into the capitals transport system. *Transport construction*. 2023;(1):2-5. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/maqpwr.

2. Николаев К. Ю. Выбор полигона и параметров применения технологии «трамвай — поезд» в России // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 5 (90). С. 40–44. EDN: https://elibrary.ru/zpawcl.

Nikolayev K. Yu. Selection of operating domain and parameters for application of the tram — train technology in Russia. *Transport of the Russian Federation*. 2020;(5):40-44. (In Russ.). (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/zpawcl.

3. Вакуленко С. П. Разработка вариантов модернизации Московской монорельсовой транспортной системы / С. П. Вакуленко [и др.] // Метро и тоннели. 2020. № 4. С. 28–35.

Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mnatsakanov V. A., Dorokhov A. V., Vlasov D. N. Development of upgrade options for the Moscow Monorail. *Metro and tunnels*. 2020;(4):28-35. (In Russ.).

4. Опыт и перспективы автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций / В. Г. Сидоренко [и др.] // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 1. С. 33–48. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48.

Sidorenko V. G., Kopylova E. V., Safronov A. I., Tumanov M. A. Experience and perspectives of transportation process control automation for rapid-transit transport of urban agglomerations. *Transport automation research*. 2023;9(1):33-48. (In Russ.). https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-33-48.

5. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Искаков [и др.] // Автоматика на транспорте. 2020. Т. 6, № 1. С. 38–63. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.

Iskakov T. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G., Chzho M. A. Approaches to quality assessment of subway traffic planning and management. *Transport automation research*. 2020;6(1):38-63. (In Russ.). https://doi.org/10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.

6. Сидоренко В. Г., Сафронов А. И. Применение генетических алгоритмов при решении задач планирования перевозочного процесса городской рельсовой транспортной системы // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 1. С. 49–62. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62.

Sidorenko V. G., Safronov A. I. Application of genetic algorithms at solution of tasks for transportation process planning of city rail transport system. *Transport automation research*. 2023;9(1):49-62. (In Russ.). https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62.

7. Маркевич А. В., Сидоренко В. Г. Интеллектуальная система построения графика работы машинистов метрополитена // Надежность. 2023. № 23 (3). С. 63–72. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-63-72.

Markevich A. V., Sidorenko V. G. An intelligent system for constructing metro train driver working schedules. *Dependability*. 2023;(23):63-72. (In Russ.). https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-63-72.

8. Сидоренко В. Г., Сафронов А. И. К вопросу об оценке быстродействия метода выравнивания временных интервалов // Информатизация образования и науки. 2014. №1 (21). С. 120–130.

Sidorenko V. G., Safronov A. I. Concerning the estimation of the fastness of the time interval equalisation method. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki*. 2014;(1):120-130. (In Russ.).

9. Сидоренко В. Г., Чжо М. А. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 6. С. 37–40.

Sidorenko V. G., Chzho M. A. Application of genetic algorithms to the scheduling of metro electric rolling stock. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2017;(6):37-40. (In Russ.).

10. Бархатный В. Д., Крюков Н. Д. Выбор участков и способов организации работы локомотивных бригад. М.: Транспорт, 1974. 36 с.

Barkhatnyy V. D., Kryukov N. D. *Selection of sections and methods of organisation of locomotive crew work*. Moscow: Transport Publ.; 1974. 36 p. (In Russ.).

11. Высоцкий Ю. Л. Сокращение времени нахождения локомотивных бригад на станциях пунктов их оборота // Труды НИИЖТа. 1979. Вып. 201/14. С. 55–61.

Vysotskiy Yu. L. Reduction of locomotive crew time at their turnaround stations. *Trudy Nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 1979;201/14:55-61. (In Russ.).

12. Мищенко Н. Г. Оптимизация длин участков обращения локомотивов и работы локомотивных бригад // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2002. № 2. С. 62–77.

Mishchenko N. G. Optimisation of locomotive turnaround section lengths and locomotive crew work. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2002;(2):62-77. (In Russ.).

13. Пазойский Ю. О. Автоматизация составления графика работы локомотивных бригад в пригородном сообщении // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1996. № 4. С. 33–39.

Pazoyskiy Yu. O. Automation of locomotive crew scheduling in suburban traffic. *Russian Railway Science Journal*. 1996;(4):33-39. (In Russ.).

14. Помазунов С. И., Муха Ю. А., Нестеренко С. И. Планирование и организация работы локомотивных бригад // Железнодорожный транспорт. 1977. № 6. С. 40–44.

Pomazunov S. I., Mukha Yu. A., Nesterenko S. I. Scheduling and organisation of locomotive crew work. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1977;(6):40-44. (In Russ.).

15. Некрашевич В. И., Сальченко В. Л., Ковалев В. Н. Организация работы локомотивных бригад по именным графикам // Железнодорожный транспорт. 2001. № 2. С. 68.

Nekrashevich V. I., Salchenko V. L., Kovalev V. N. Organisation of work of locomotive crews according to nominal schedules. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2001;(2):68. (In Russ.).

16. Тишкин Е. М. Организация работы локомотивных бригад на основе графика движения поездов. М.: Транспорт, 1968. 27 с.

Tishkin E. M. *Organisation of locomotive crew work on using train schedules*. Moscow: Transport; 1968. 27 p. (In Russ.).

17. Pang Shinsiong, Chen Mu-Chen. Optimize railway crew scheduling by using modified bacterial foraging algorithm. *Computers & Industrial Engineering*. 2023;180:109218. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109218.

18. Janacek J., Kohani M., Koniorczyk M., Marton P. Optimization of periodic crew schedules with application of column generation method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017; 83:165-178. https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.008.

19. Neufeld J., Scheffler M., Tamke F., Hoffmann K., Buscher U. An Efficient Column Generation Approach for Practical Railway Crew Scheduling with Attendance Rates. *European Journal of Operational Research*. 2020;293:113-1130. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.058.

20. Rählmann C., Thonemann U. Railway crew scheduling with semi-flexible timetables. *OR Spectrum*. 2020;42:835-862. https://doi.org/10.1007/s00291-020-00592-y.

21. Heil J. A Solution Approach for Railway Crew Scheduling with Attendance Rates for Multiple Networks. In: *Operations Research Proceedings*. [S. l.]; 2018. p. 547–553 https://doi.org/10.1007/978-3-030-18500-8_68.

22. Markevich A. V., Sidorenko V. G. Automation of Scheduling for Drivers of the Subway Rolling Stock. In: *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia. 2021*. [S. l.]; 2021. p. 1–10. https://doi.org/EWDTS52692.2021.9580990.

23. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Safronov A. I., Aung K. M. Application of Genetic Algorithms for the Planning of Urban Rail Transportation System. In: *Traffic Flow Theory and Research in Civil and Transportation Engineering (TSTP 2021). Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Cham: Springer; 2022. p. 21–39. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93370-8_2.

24. Кулагин М. А., Маркевич А. В., Сидоренко В. Г. Единство подходов к интеллектуализации цифровой трансформации управления производственным и человеческим потенциалом на железнодорожном транспорте // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. материалов II Междунар. конф., Москва, 24–25 августа 2023 г. М., 2023. С. 256–260.

Kulagin M. A., Markevich A. V., Sidorenko V. G. Unity of approaches to the intellectualisation of digital transformation of production and human potential management on railway transport. In: *Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon: Proceedings of the II International Conf., Moscow, 24–25 August 2023*. Moscow; 2023. p. 256–260. (In Russ.).

25. Копылова Е. В., Туманов М. А., Сидоренко В. Г. Проблемы и перспективы создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами на линейных объектах пассажирского комплекса железнодорожного транспорта // Наука и техника транспорта. 2023. № 4. С. 95–100. EDN: https://elibrary.ru/ynespv.

Kopylova E. V., Tumanov M. A., Sidorenko V. G. Problems and prospects of creating smart control systems of technological processes at linear objects of passenger railway transport complex. *Science and Technology in Transport*. 2023;(4):95-100. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/ynespv.

26. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P., Safronov A. I. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction. *Russian Electrical Engineering*. 2021;92:492-498. https://doi.org/10.3103/S1068371221090030.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агата Владимировна МАРКЕВИЧ,
канд. техн. наук, бизнес-аналитик практики САП, Терралинк Девелопмент (115088, г. Москва, 2-й Южнопортовый проезд, д. 33, стр. 1), vlasjuk.a@mail.ru, Author ID: 3308-0237

Валентина Геннадьевна СИДОРЕНКО,
д-р техн. наук, профессор, кафедра «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1071-6147, https://orcid.org/0000-0003-4941-9008

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Agata V. MARKEVICH,
Cand. Sci. (Eng.), Business Analyst of SAP Practice, Terralink Development (115088, Moscow, 33/1, 2 Yuzhnoportovyy pas.,), vlasjuk.a@mail.ru, Author ID: 3308-0237

Valentina G. SIDORENKO,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Control and Information Security, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 1071-6147, https://orcid.org/0000-0003-4941-9008

ВКЛАД АВТОРОВ

Агата Владимировна МАРКЕВИЧ. Реализация разработанных алгоритмов в интеллектуальной системе построения графика работы машинистов метрополитена и их апробация для реальных условий городских рельсовых транспортных систем (50%).

Валентина Геннадьевна СИДОРЕНКО. Анализ накопленного опыта, разработка математического обеспечения интеллектуальной системы построения графика работы машинистов метрополитена (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Agata V. MARKEVICH. Implementation and approbation of the developed algorithms in the smart metro driver scheduling system in real urban railways (50%).

Valentina G. SIDORENKO. Experience analysis, development of mathematical support for the smart metro driver scheduling system (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 01.03.2024, рецензия от первого рецензента получена 26.03.2024, рецензия от второго рецензента получена 29.05.2024, рецензия от третьего рецензента получена 31.05.2024, принята к публикации 05.06.2024.
The article was submitted 01.03.2024, first review received 26.03.2024, second review received 29.05.2024, third review received 31.05.2024, accepted for publication 05.06.2024.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.