

# Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах

## Train traffic planning in intelligent transportation systems

Баранов Л.А.<sup>1</sup>, Сафронов А.И.<sup>1\*</sup>, Сидоренко В.Г.<sup>1</sup>  
Leonid A. Baranov<sup>1</sup>, Anton I. Safronov<sup>1\*</sup>, Valentina G. Sidorenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup>Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

\*safronov-ai@mail.ru



Баранов Л.А.



Сафронов А.И.



Сидоренко В.Г.

**Резюме. Цель.** Предложить новый способ энергоэффективного составления плана перевозочного процесса для линий метрополитена. Под планом перевозочного процесса понимается составление графика движения пассажирских поездов, удовлетворяющего всем предъявляемым к нему требованиям и ограничениям, связанным с ежечасным выполнением заданной парности движения поездов, эффективным использованием пропускной и провозной способности рассматриваемой линии метрополитена, безопасностью движения транспортных средств, обеспечиваемой своевременно проводимой технической диагностикой единиц электроподвижного состава в форме текущих плановых ремонтов и осмотров в депо и/или линейных пунктах технического осмотра, комфортом для пассажиров, выражающемся в равномерности появлений электропоездов на станциях, что в свою очередь обеспечивает перераспределение пассажиропотоков на станциях и исключает избыточное скопление людей на платформах. **Методы.** Применяются методы автоматизированного построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена, базирующиеся на использовании критериев равномерности интервалов движения поездов, а также равномерности распределения единиц электроподвижного состава при планировании переходных процессов, с последующим перераспределением времен сверхрежимных выдержек, введенных алгоритмом автоматизации, на времена хода по перегонам. Метод равномерности интервалов движения поездов базируется на минимизации суммы квадратичных отклонений интервалов по отправлению поездов по всем станциям для всех поездов. Метод равномерности транспортных средств внутри переходных процессов базируется на применении алгоритма целочисленного деления Евклида. При составлении статьи авторы учитывали наличие на линиях метрополитена систем различных уровней автоматизации, регламентированных международным стандартом IEC 62290-1:2014. Внимание уделено не только транспортным системам с высокоуровневым развитием средств автоматики, классифицируемым стандартом как GoA3 и GoA4, но и транспортным системам с низким развитием средств автоматики (они классифицируются как GoA0, GoA1 и GoA2). **Результаты.** Предложенный в статье способ наглядно подтверждает сокращение расхода электроэнергии, затрачиваемой на тягу при движении поездов, пропорционально длительностям сверхрежимных выдержек, введенных в процессе работы алгоритмов автоматизации, заложенных в интеллектуальную автоматизированную систему построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена. **Выводы.** Изложенный подход доказывает прямую зависимость энергоэффективности плана движения поездов от равномерности распределения управляющих воздействий по корректировке интервалов попутного следования поездов и длительностей введенных сверхрежимных выдержек, определению последовательностей вводимых / снимаемых единиц электроподвижного состава внутри переходных процессов, по рациональному размещению точек ночной расстановки на графике движения поездов метрополитена. Материалы, изложенные в статье, расширяют имеющуюся базу знаний в области автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене, что, в свою очередь, предоставляет возможность для дальнейшего совершенствования методики построения интеллектуальных транспортных систем, учитывающих наличие внедренных систем автоведения поездов высоких уровней автоматизации (GoA3 и GoA4).

**Abstract. Aim.** To suggest a new method of energy-efficient traffic planning for subways. Traffic planning is understood as passenger train scheduling in compliance with all the applicable requirements and restrictions involving hourly performance in terms of the specified number of handled train pairs, efficient use of the theoretical and practical capacity of a given subway line, safety of vehicle traffic ensured by timely technical diagnostics of the rolling stock in the form of scheduled repairs and inspections in depots and/or lineside technical inspection stations, passenger comfort expressed in the uniformity of train delivery to stations, which, in turn, ensures the redistribution of passenger flows at stations and prevents congestion on platforms.

**Methods.** The paper uses methods of automated construction of target metro train schedules that are based on the criteria of train spacing uniformity, as well as uniformity of rolling stock distribution in the process of transition planning, with subsequent redistribution of delay times defined by the automation algorithm over the station-to-station travel times. The method of uniform travel times is based on minimizing the sum of square deviations of departure times for all stations and all trains. The method of vehicle uniformity within transition processes is based on the application of the Euclidean integer division algorithm. When preparing the paper, the authors took into account the fact that metro lines feature systems of various levels of automation regulated by the IEC 62290-1-2014 international standard. Attention was paid not only to transportation systems with high degrees of automation (classified as GoA3 and GoA4 in the standards), but those with low automation (classified as GoA0, GoA1 and GoA2) as well. **Results.** The method proposed in the paper clearly shows reduced power consumption associated with train traction that is proportional to the durations of delayed departures defined by the automation algorithms of the intelligent automated system for target metro train schedule construction. **Conclusions.** The presented approach clearly indicates a direct correlation between the energy efficiency of a train schedule and the uniformity of distribution of control actions that adjust train spacing and the durations of the adopted delays, defines the sequences of added/removed units of rolling stock within transition processes, as well as rational night-time train allocation. The materials presented in the paper extend the available knowledge in the field of automation of metro train traffic planning, thus enabling further improvement of the methods of intelligent transportation system design that take into account the deployed highly automated train driving systems (GoA3 and GoA4).

**Ключевые слова:** плановый график движения поездов, автоматизированное построение, метрополитен, уровни автоматизации, энергоэффективность, алгоритмы, время хода.

**Keywords:** target train schedule, automated construction, metro, grades of automation, power efficiency, algorithms, travel times.

**Для цитирования:** Баранов Л.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах // Надежность. 2022. №3. С. 35–43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>

**For citation:** Baranov L.A., Safronov A.I., Sidorenko V.G. Train traffic planning in intelligent transportation systems. *Dependability* 2022;3: 35-43. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>

**Поступила 28.04.2022 г. / После доработки 17.05.2022 г. / К печати 19.09.2022 г.**

**Received on: 28.04.2022 / Revised on: 17.05.2022 / For printing: 19.09.2022.**

## Введение

Существование современных мегаполисов немислимо без развитой транспортной инфраструктуры [1]. В этих условиях необходимо решение задач интеллектуализации и оптимизации управления, направленное на перераспределение имеющихся ресурсов и пассажиропотоков с целью обеспечения комфортных перевозок [2, 3]. Существенные результаты достигнуты специалистами, решающими задачи этого класса для сетей городских рельсовых транспортных систем (ГРТС), к которым относятся метрополитены, трамваи, внутригородские и пригородные электропоезда, проходящие по территории города. Примером сети движения внутригородских электропоездов является Московское Центральное Кольцо (МЦК), сети движения пригородных поездов – участки Московских Центральных Диаметров (МЦД) [3, 4].

Действующая стратегия организации движения транспортных средств (ТС) ГРТС направлена на достижение единой цели – комфортной и безопасной перевозки пассажиров [5]. В этих условиях важен выбор

способов управления движением ТС, обеспечивающих минимизацию расхода энергии, затрачиваемой на тягу. Расход электроэнергии на тягу ТС в общем расходе электроэнергии Московского метрополитена составляет величину порядка 80%, что соответствует 10% стоимости предоставляемых услуг [2]. Эффективность от снижения расходов энергии имеет большое значение с точки зрения экологии.

## 1. Обзор источников

Для эффективного управления ГРТС существенно качественное планирование перевозочного процесса, заключающегося в составлении плановых графиков движения (ПГД) поездов [6]. Опубликовано и внедрено значительное число работ, посвященных автоматизации процессов управления движением поездов (ДП) на ГРТС [7, 8, 9].

Автоматизированные системы управления ДП в качестве подсистемы включают аппаратно-программный комплекс создания планового графика движения поездов – нормативного документа, содержащего сведения о

порядке работы рассматриваемых линий метрополитена (ЛМ) и увязывающего работу всех его Служб [6].

К ПГД предъявляются следующие требования:

- обеспечение безопасности ДП [1, 5, 6, 7, 10, 11, 12];
- соблюдение заданной парности ДП в каждом часе работы метрополитена [6, 13, 14];
- согласованность с графиком оборота электроподвижного состава [1, 7, 9, 15, 16, 17];
- связанность с графиком работы локомотивных бригад [6, 7, 9, 18];
- наличие ресурсов для компенсации возмущений, требующих снятия составов с ЛМ и/или других мероприятий при возникновении больших сбоев [7, 11, 17, 18, 19, 20];
- соблюдение регламента расстановки поездов на ЛМ на ночь [1, 5, 21];
- соответствие должному уровню качества, оцениваемого согласно эксплуатационным показателям, сформулированным в [6, 13];
- обеспечение энергоэффективности при прочих равных условиях [2, 22];
- обеспечение комфорта обслуживания пассажиров [1, 3, 5, 7, 14, 19].

При автоматизации построения ПГД добавляются требования своевременного формирования базы данных ЛМ, алгоритмизации последовательности этапов планирования перевозочного процесса. Составными частями плана перевозочного процесса являются разработка графика оборота электроподвижного состава (ГО ЭПС) и графика работы локомотивных бригад (ГРЛБ).

ГО ЭПС – нормативный документ, определяющий проведение ремонтов и осмотров ЭПС с разбивкой по маршрутам («маршрут» – физический состав с присвоенным ему на сутки номером) [6].

ГРЛБ – нормативный документ, определяющий порядок труда и отдыха локомотивных бригад.

Построение ПГД, как будет показано ниже, зависит от уровня процессов управления ДП. Стандартом (ИЕС 62290-1:2014) [23] приняты определенные в [24] уровни автоматизации GoA.

При GoA0 и GoA1 машинистом реализуются с заданной точностью не более двух (реже трех) заданных времен хода ( $T_x$ ), при GoA3 и GoA4 система реализует с заданной точностью практически любое количество  $T_x$ . За счет использования многообразия  $T_x$  можно получить ПГД, обеспечивающий дополнительную энергоэффективность. Это будет показано в данной работе.

В работах зарубежных авторов [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] вопросы, связанные с автоматизацией построения ПГД, находятся в центре внимания.

Интервал ДП в метрополитене Шанхая варьируется от 2 до 15 минут [29, 33, 34]. По сравнению с интервалами, действующими на Московском метрополитене (от 1,5 до 6 минут), метрополитен Шанхая обладает большими ресурсами управления, что существенно при планировании перевозочного процесса. Необходимая интенсивность ДП на Московском метрополитене опре-

деляется дополнительными жесткими требованиями, предъявляемыми к решению поставленных задач.

В работах [7, 9, 35] создана и описана модель автоматизированного построения ПГД, используемая по настоящее время. В них отмечена взаимосвязь ПГД с ГО ЭПС и согласованность с ГРЛБ.

В 2004 году на Московском метрополитене внедрена автоматизированная система построения ПГД («АРМ Графиста»). Эта система продолжает развиваться, учитывая особенности ЛМ различной топологии при варьировании типов организации ДП на ЛМ [6, 14]. Уменьшения времени автоматизированного построения ПГД удалось добиться при использовании аппарата параллельных вычислений [36].

В работах [15, 16] показаны принципы варьирования ГО ЭПС, используемого в качестве исходной информации при автоматизированном построении ПГД.

В [16] показано, что разработанные алгоритмы составления деревьев заполнения / освобождения точек ночной расстановки способствуют ускорению процесса и повышению качества автоматизации построения ПГД. Работы базируются на применении генетического алгоритма (ГА), который показал свою эффективность при решении задач транспортной отрасли [16].

В [18] предложена методика учета ПГД при автоматизированном построении ГРЛБ. При построении ГРЛБ свою эффективность так же показал ГА. Отдельное место при планировании перевозочного процесса занимает задача организации работ по созданию аппаратно-программного комплекса интеллектуального планирования ДП. Задача решалась с использованием гибких технологий программирования (*agile*).

Особую роль при внедрении систем планирования перевозочного процесса играет учет традиций и опыта составления ПГД, ГО ЭПС, ГРЛБ сотрудниками Служб метрополитена при отсутствии автоматизации. Существенным является, в частности, выбор способов построения переходных режимов ДП (от «непики» к «пику» и обратно), использование сверхрежимных выдержек (СРВ) при организации переходных режимов в условиях ограниченного числа заданных  $T_x$  по перегонам в ручном управлении.

В данной статье рассмотрена задача построения ПГД в условиях функционирования метрополитена, использующего автоматическую систему управления ДП GoA3 и GoA4 [23, 24].

В этом случае благодаря возможности точно выполнять множества различных  $T_x$  по перегонам реализуется возможность отказа от СРВ. Это, в конечном итоге, приводит к построению энергоэффективного ПГД.

При внедрении автоматизированной системы важен учет традиций, существовавших при ручном построении ПГД. Это в значительной степени сказывается на эффективности внедрения версий системы на предприятии и взаимодействия с сотрудниками метрополитена.

ПГД, составленный по алгоритмам «АРМ Графиста», на отдельных этапах отличается от традиционного.



Равномерность расположения вводимых / снимаемых составов и интервалов при наличии преимуществ с точки зрения комфорта обслуживания пассажиров не всегда реализуются при «ручной» разработке технологами. Это связано с увеличением количества информации, затрудняющей прочтение ПГД диспетчерами при отсутствии автоматизации управления.

Созданы дополнительные алгоритмы, позволяющие исполнить «вкусовые» требования технологов. Задача имеет рациональное и энергоэффективное решение при внедрении автоматической системы управления GoA3 и GoA4.

В этих условиях может быть изменена процедура ввода/снятия при переходе с часов «непик» на часы «пик» и обратно. Существо изменений заключается в отказе от СРВ и управлении интервалами ДП в переходных режимах путем использования многообразия  $T_x$ .

## 2. Методы

### 2.1. Автоматизированное построение ПГД при конечном количестве различных времен хода по перегонам: для GoA0, GoA1, GoA2

Для GoA0, GoA1 и GoA2 в переходных режимах «АРМ Графиста» использует ввод СРВ так же, как и при ручном построении ПГД для управления интервалами в окрестностях вводов/снятий ЭПС. Пример для случая увеличения парности представлен на рис. 1.

В данном примере равномерно распределены CPB по станциям, расположенным в ближайших окрестностях станции связи с электродепо. Достоинством равномерного распределения CPB на нескольких станциях по сравнению со вводом одной длинной CPB на одной станции является обеспечение комфорта при перевозке пассажиров [5]. Равномерное распределение CPB в случае рассмотрения уровней автоматизации, как будет показано в дальнейшем, позволяет алгоритмически просто перейти к энергоэффективному ПГД.

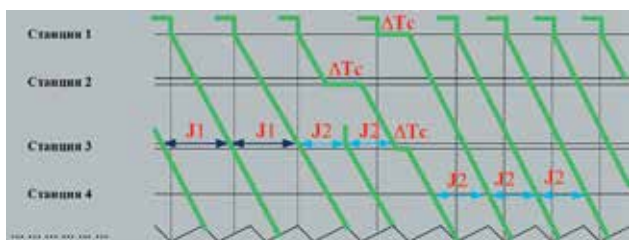


Рис. 1. Пример изменения «парности» движения поездов при использовании только сверхрежимных выдержек

## 2.2. Автоматизированное построение ПГД при отсутствии ограничений на количество различных времен хода по перегонам: для GoA3 и GoA4

Рассмотрим новые принципы построения ПГД в переходном режиме для GoA3 и GoA4, учитывающие получение энергоэффективности при автоматизированном построении ПГД.

На рис. 2 показан фрагмент ПГД только при увеличении  $T_x$  поезда, следующего за вводимым. Измененные  $T_x$  отмечены отклонениями от пунктирных линий стандартных «ниток».

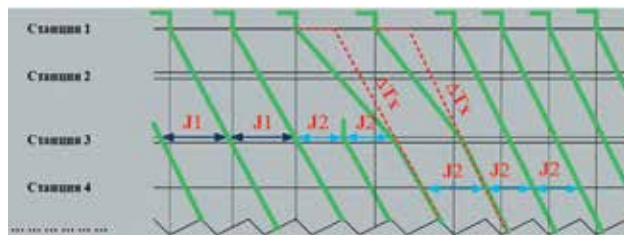


Рис. 2. Пример изменения «парности» движения поездов при увеличении общего времени хода по линии метрополитена

Поезда с СРВ и увеличенным  $T_x$  суммарно осуществляют более длительное движение по ЛМ по сравнению с остальными поездами.

На рис. 1 показан ввод ЭПС, при котором достаточно всего двух поездов и ресурсов одной (предшествующей) станции / одного перегона для выравнивания интервалов. Как правило, для выравнивания требуется задействовать больше инфраструктурных объектов. Возможно и комбинирование управляющих воздействий при планировании перевозочного процесса.

Фрагмент переходного режима можно характеризовать параметром  $\tau$  (критерием эффективности ПГД при энергооптимальном распределении  $T_x$  по ЛМ), определяющим, какая часть из общего  $T_x$  поезда по ЛМ используется в режиме работы тяговых двигателей:

$$\tau = \begin{cases} \frac{T_{XJ1} - \sum_{i=1}^{S-1} T_{C1}[i] + T_{XJ2} - \sum_{i=1}^{S-1} T_{C2}[i]}{T_{XJ}}, & \text{при движении по двум путям;} \\ \frac{T_{XJ} - \sum_{i=1}^{S-1} T_C[i]}{T_{XJ}}, & \text{при движении по одному пути.} \end{cases} \quad (1)$$

где  $T_{x1}$  – общее  $T_x$  по ЛМ;  $T_{x11} - T_x$  по I главному пути ЛМ;  $T_{x12} - T_x$  по II главному пути ЛМ;  $T_{c1}[i]$  – длительность плановой стоянки ( $T_c$ ) на  $i$ -й станции для I главного пути ЛМ;  $T_{c2}[i]$  – длительность  $T_c$  на  $i$ -й станции для II главного пути ЛМ;  $T_{c}[i]$  – длительность  $T_c$  на  $i$ -й станции для любого пути ЛМ;  $S$  – количество станций на ЛМ.

Формула (1) составлена при исключении времен оборотов поездов по конечным станциям ( $T_{об1}$  и  $T_{об2}$ ). Это время не влияет на значение параметра  $\tau$ . В формуле не участвует величина времени полного оборота состава ( $T_{по}$ ), взамен взята величина  $T_x$  по линии метрополитена ( $T_{хл}$ ). На рис. 3 показаны составляющие  $T_{по}$  поезда для ЛМ.

На рис. 4 показан переход от времени полного оборота поезда к величине времени хода по линии метрополитена. При сравнении рис. 3 и рис. 4 видно, что  $T_{\text{н}}$  на ко-

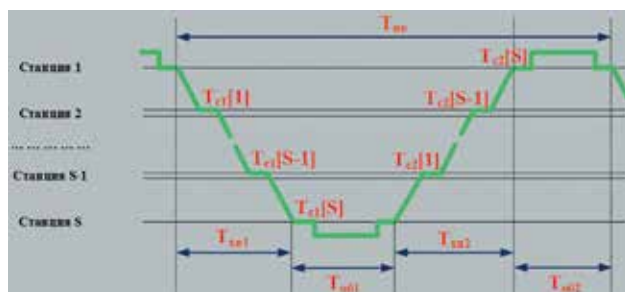


Рис. 3. Составляющие времени полного оборота поезда по ЛМ (ДП по двум путям)

нечных станциях являются составляющими (\$T\_{об1}\$ и \$T\_{об2}\$) по тупикам ЛМ, потому они не участвуют в расчете, выполняемом по формуле (1). Выполняется вычитание всех \$T\_c\$, кроме тех \$T\_c\$, которые относятся к конечным станциям (счет не до \$S\$, а до \$S-1\$).

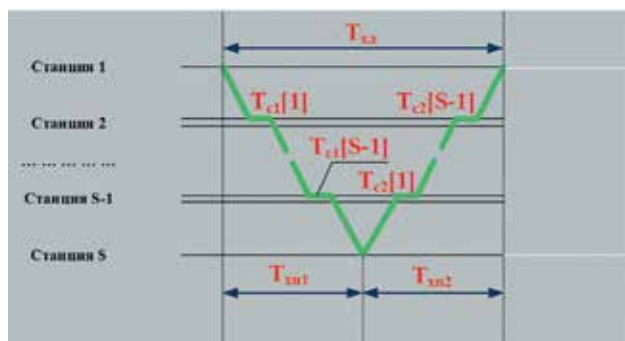


Рис. 4. Составляющие ДП при исключении оборотов поезда (в каждом из двух направлений)

Величины \$\tau\$ для поездов, «нити» которых не перестраиваются в установившемся режиме ПГД, для каждого из установившихся режимов (час «пик» и час «непик») постоянны.

При фиксированных значениях \$T\_{хп1}\$ и \$T\_{хп2}\$ величина показателя \$\tau\$ максимальна при минимально допустимых \$T\_c\$ на всех станциях – расход энергии на тягу поезда, движущегося по этой «нитке», минимален. Уменьшение \$\tau\$ – увеличение расхода энергии.

Для сравнения величин показателя \$\tau\$ для «ниток» установившегося режима ПГД, «нити», имеющие только СВВ в переходных режимах ПГД и «ниток» только с увеличенным \$T\_x\$ по перегонам в переходных режимах ПГД ниже рассмотрим выражения, упрощающие анализ.

$$T_{хп1БС} = T_{хп1} - \sum_{i=1}^{S-1} T_c[i], \quad (2)$$

где \$T\_{хп1БС} - T\_x\$ по главному пути без учета \$T\_c\$ на станциях в установившемся режиме.

При этом обозначим (3), (4) и (5):

$$\tau_y = \frac{T_{хп1БС}}{T_{хп1}}, \quad (3)$$

где \$\tau\_y\$ – критерий эффективности ПГД при энергооптимальном распределении \$T\_x\$ по ЛМ в установившемся режиме ПГД;

$$\tau_2 = \frac{T_{хп1БС}}{T_{хп1} + R}, \quad (4)$$

где \$\tau\_2\$ – критерий эффективности ПГД при энергооптимальном распределении \$T\_x\$ по ЛМ в переходном режиме ПГД, реализуемом только при использовании СВВ; \$R\$ – сумма длительностей СВВ, которые добавлены к \$T\_c\$ установившегося режима ПГД;

$$\tau_3 = \frac{T_{хп1БС} + R}{T_{хп1} + R} = \frac{T_{хп1Д}}{T_{хп1} + R}, \quad (5)$$

где \$\tau\_3\$ – критерий эффективности ПГД при энергооптимальном распределении \$T\_x\$ по ЛМ в переходном режиме, реализуемом без СВВ; \$T\_{хп1Д} = T\_{хп1БС} + R\$ – есть \$T\_x\$ поезда по главному пути ЛМ, равное сумме \$T\_x\$ поезда по ЛМ в установившемся режиме (без учета \$T\_c\$) и дополнительного времени, необходимого для замены длительностей всех СВВ с целью реализации переходного режима. Очевидно, что дополнительное время движения, равно сумме длительностей СВВ.

Так как \$R\$, как правило, много меньше \$T\_{хп1}\$, то \$\tau\_2\$ близко к \$\tau\_y\$, а \$\tau\_3\$ практически линейно растет при увеличении \$R\$, что свидетельствует об энергоэффективности реализуемого переходного процесса ПГД без использования СВВ.

### 3. Результаты

В качестве примера рассматривается величина \$\tau\$ для различных ЛМ города Москвы в часы «пик» и «непик» – в установившихся режимах.

Замена СВВ увеличением \$T\_x\$ приводит к снижению расхода электроэнергии на тягу поезда. Следовательно, для «ниток» переходного процесса показатель \$\tau\$ является показателем энергоэффективности.

Величина экономии энергии при перераспределении СВВ на \$T\_x\$ по перегонам – это расстояние от точки на нижней прямой до соответствующей точки на верхней прямой (рис. 5).

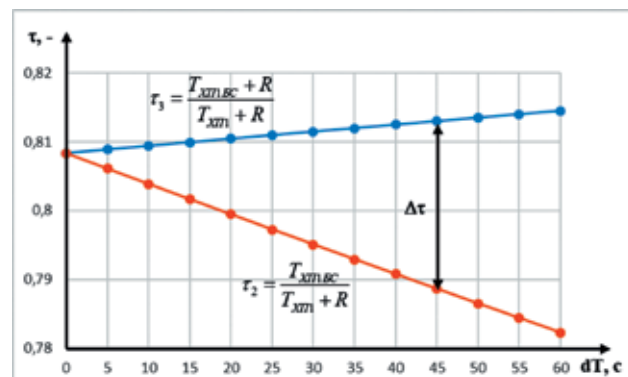


Рис. 5. График изменения параметра \$\tau\$ при переходе от выравнивания интервалов вводом сверхрежимных выдержек (нижняя прямая) к выравниванию интервалов изменением времени хода по Кольцевой линии (верхняя прямая)

Показаны величины \$\tau\$ для ситуаций, проиллюстрированных на рис. 1 и рис. 2. Увеличение \$T\_x\$ на каждые 5



Рис. 6. График снижения расхода электроэнергии при увеличении времени хода

секунд, как показали выполненные расчеты при энергооптимальных режимах ведения поездов, приводят к сокращению расхода электроэнергии на 1% [22]. Можно оценить энергоэффективность ПГД в переходный период. Эта оценка и представлена на рис. 5.

На рис. 6 показан график суммарной экономии электроэнергии для одного поезда при увеличении  $T_x$  на различных перегонах. Рассмотрен диапазон увеличения  $T_x$  от 5 секунд до 4 минут и 25 секунд. Этого диапазона достаточно для управления интервалами ДП при планировании перевозочного процесса на ЛМ в условиях ограниченных ресурсов.

## Заключение

1. Анализ работ и тенденций в области интеллектуализации и автоматизации управления движением поездов показал необходимость дальнейшего совершенствования составляющих интеллектуальных систем управления движением поездов путем включения в их состав автоматических интеллектуальных подсистем формирования плановых графиков движения поездов, графиков оборота электроподвижного состава, графиков работы локомотивных бригад.

2. Анализ выполненных исследований, разработок и результатов внедрения «АРМ Графиста» для GoA1 и GoA2 показал их эффективность в условиях работы Московского метрополитена и наличие научного задела для модернизации этих систем для GoA3 и GoA4.

3. Предложенные новые принципы построения плановых графиков движения поездов, исключающие сверхрежимные выдержки в переходных режимах изменения парности на линиях метрополитена, позволяют использовать энергоэффективный плановый график движения поездов для этих условий.

4. Разработана методика анализа эффективности плановых графиков движения поездов, использующих сверхрежимные выдержки.

5. Использование современных интеллектуальных алгоритмов (генетического алгоритма, алгоритма прогноза возмущений, *agile*-подхода) является основой разработки интеллектуальных автоматизированных систем управления движением поездов.

## Финансирование / Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001 (Заявка 2020 года): «Разработка моделей и методов оптимизации производственных ресурсов городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) на основе технологии больших данных (bigdata)».

## Библиографический список

1. Сафронов А.И., Лысенко Е.В. Моделирование плана перевозочного процесса в утренний час пик на замкнутой Большой Кольцевой линии Московского метрополитена // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 4. С. 584-616.
2. Баранов Л.А., Сидоренко В.Г., Балакина Е.П. и др. Минимизация расхода энергии на тягу поездов внеуличного городского транспорта // Электротехника. 2021. № 9. С. 26-34.
3. Сафронов А.И. Доступность рельсовых транспортных систем города Москвы // ПУБСС : материалы XXIX международной научно-практической конференции, 15 декабря 2021. М.: ИПУ РАН. 2021. С. 336-342.
4. Роменский Д.Ю., Калинин К.А. Пропуск электропоездов диаметральных маршрутов через центральную часть транспортных узлов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2 (57). С. 24-32.
5. Логинова Л.Н., Сеславина Е.А., Сеславин А.И. Методика составления расписания движения поездов для столичного метрополитена // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 1. С. 67-77.



6. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Построение планового графика движения для метрополитена // Мир транспорта. 2011. Т. 9. № 3 (36). С. 98-105.
7. Баранов Л.А., Жербина А.И. Построение на ЭВМ графика движения поездов метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. 1981. № 2. С. 17-20.
8. Астрахан В.И., Жербина А.И. Алгоритмизация процесса составления графика движения поездов метрополитена // Тр. МИИТ. 1975. № 492. С. 99-105.
9. Тишкин Е.М., Феофилов А.Н. Автоматизированный расчет графиков движения поездов метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. 1989. № 2. С. 8-9.
10. Иконников С.Е. Контроль безопасности в современных системах обеспечения движения поездов // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2021. № 1. С. 51-53.
11. Сидоренко В.Г. Современные вызовы безопасности городских транспортных систем // ПУБСС: материалы XXVIII международной конференции. М.: ИПУ РАН. 2020. С. 434-439.
12. Сеславина Е.А., Сеславин А.И. Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности движения поездов // Экономика железных дорог. 2019. № 5. С. 69-75.
13. Сафронов А.И. Подходы к решению задачи автоматизации документооборота перевозочного процесса в Московском метрополитене // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 3. С. 425-441.
14. Сидоренко В. Г., Новикова М.В. Синтез планового графика движения зонного типа // Мир транспорта. 2009. Т. 7. № 4 (28). С. 128-134.
15. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И., Филиппченко К.М. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 4 (59). С. 154-165.
16. Сидоренко В.Г., Чжо М.А. Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 6. С. 13-16.
17. Сидоренко В.Г., Чжо М.А., Алексеев В.М. и др. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов // Электротехника. 2017. № 12. С. 73-76.
18. Маркевич А.В., Сидоренко В.Г. Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма // Информатизация образования и науки. 2019. № 3 (43). С. 36-49.
19. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Методика выравнивания интервалов движения пассажирских поездов метрополитена в условиях ограниченных ресурсов // Вестник РГУПС. 2014. № 2 (54). С. 69-76.
20. Баранов Л. А., Воробьева Л.Н. Синтез законов централизованного управления движением поездов на линии метрополитена на базе имитационной модели // Вестник МИИТ. 2004. № 11. С. 3.
21. Сидоренко В.Г., Филиппченко К.М., Чжо М.А. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена // Электротехника. 2016. № 9. С. 19-25.
22. Баранов Л.А., Кузнецов Н.А., Максимов В.М. Энергооптимальное управление движением транспортных средств // Электротехника. 2016. № 9. С. 12-18.
23. IEC 62290-1:2014. Railway Applications – Urban Guided Transport Management and Command/Control Systems – Part 1: System Principles and Fundamental Concepts. – International Electrotechnical Commission. 2014-07-01.
24. Плеханов П.А. Вопросы стандартизации и безопасности миграции к будущей системе железнодорожной подвижной связи // СП6НТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2021. Т. 1 (76). С. 219-221.
25. Ning B., Brebbia C.A., Tomii N. Computers in Railways XII : Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. 1024 p.
26. Fan W. Reliability analysis of stochastic park-and-ride network // Journal of Modern Transportation. 2012. № 1. Pp. 57-64.
27. Deng L., Zeng Q., Gao W. et al. Optimization of train plan for urban rail transit in the multi-routing mode // Journal of Modern Transportation. 2011. № 4. Pp. 233-239.
28. D’Acierno L., Botte M., Gallo M. et al. Defining Reserve Times for Metro Systems: An Analytical Approach // Journal of Advanced Transp. 2018. Pp. 1-15.
29. Gong C., Zhang S., Zhang F. et al. An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One // Energies. 2014. Vol. 7 (11). Pp. 7305-7329.
30. Liu R.R., Golovitcher I.M. Energy-efficient operation of rail vehicles // Transport Research. A Policy Practice. 2003. Vol. 37. Pp. 917-932.
31. Noah J.G. Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes // Transp. Research Record: Journal of the Transp. Research Board. 2014. № 2424. Pp. 58-65.
32. Turner C., Tiwari A., Starr A. et al. A review of Key Planning and Scheduling in the Rail Industry in Europe and UK // Rail and Rapid Transit: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. 2016. Vol. 230. № 3. Pp. 984-998.
33. «Наше метро» [Электронный ресурс] : Шанхайский метрополитен. URL: <http://n-metro.ru/шанхайский-метрополитен/> (дата обращения: 07.05.2021).
34. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы [Электронный ресурс] : Метрополитены мира. URL: <https://stroimsk.ru/mobile/metro/metropoliteny-mira/> (дата обращения: 07.05.2021).
35. Дегтярев Д.П. Теория и методы автоматизации построения графиков движения поездов на метрополитене. СПб.: ПГУПС. 2002. 147 с.
36. Сидоренко В.Г., Петров А.С. Архитектура многопоточного программного продукта, реализующего планирование логистических процессов // Информатизация образования и науки. 2020. № 1 (45). С. 25-38.

## References

1. Safronov A.I., Lysenko E.V. Modeling the Plan of the Transportation Process during the Morning Rush Hour of the Closed Bolshaya Koltsevaya Line of the Moscow Metro. *Transport automation research* 2021;7(4):584-616. (in Russ.)
2. Baranov L.A., Sidorenko V.G., Balakina E.P. et al. [Minimizing traction power consumption of a rapid transit system]. *Russian Electrical Engineering* 2021;9:26-34. (in Russ.)
3. Safronov A.I. [Availability of rail transportation systems of Moscow]. In: [Proceedings of the XXIX International Research and Practice Conference Matters of Safety Management of Complex Systems]. Moscow: RAS ICS; 2021. Pp. 336-342. (in Russ.)
4. Romenskiy D.Yu., Kalinin K.A. Electric Trains Passage of Diameter Routes Through the Transport Hub Central Part. *The Siberian Transport University Bulletin* 2021;2(57):24-32. (in Russ.)
5. Loginova L.N., Seslavina E.A., Seslavin A.I. Methodology of Train Traffic Scheduling for the Capital Underground. *Transport automation research* 2022;8(1):67-77. (in Russ.)
6. Sidorenko V.G., Safronov A.I. [Constructing a target traffic schedule for a subway]. *World of Transport and Transportation* 2011;3(36):98-105. (in Russ.)
7. Baranov L.A., Zherbina A.I. [Constructing a metro train schedule using a computer]. *Russian Railway Science Journal* 1981;2:17-20. (in Russ.)
8. Astrakhan V.I., Zherbina A.I. [Algorithimization of metro train traffic scheduling]. *Proceeding of MIIT* 1975;492:99-105. (in Russ.)
9. Tishkin E.M., Feofilov A.N. [Automated calculation of metro train schedules]. *Russian Railway Science Journal* 1989;2:8-9. (in Russ.)
10. Ikonnikov S.E. [Safety monitoring in advanced train management systems]. *[History and outlook of transportation development in the north of Russia]* 2021;1:51-53.
11. Sidorenko V.G. [Today's security challenges of urban transportation systems]. In: [Proceedings of the XXVIII International Research and Practice Conference Matters of Safety Management of Complex Systems]. Moscow: RAS ICS; 2020. Pp. 434-439. (in Russ.)
12. Seslavina E.A., Seslavin A.I. [Risk-oriented approach to ensuring train traffic safety]. *The Railway Economics* 2019;5:69-75. (in Russ.)
13. Safronov A.I. [Approaches to the automation of the documentation procedures associated with the transportation process in the Moscow Metro]. *Transport automation research* 2016;2(3):425-441. (in Russ.)
14. Sidorenko V.G., Novikova M.V. [Synthesising a zoned target traffic schedule]. *World of Transport and Transportation* 2009;4(28):128-134. (in Russ.)
15. Sidorenko V.G., Safronov A.I., Filipchenko K.M. Automation of Operations Scheduling of Metro Electric Rolling Stock. *World of Transport and Transportation* 2015;4(59):154-165. (in Russ.)
16. Sidorenko V.G., Zhuo M.A. Application of genetic algorithms for underground electric trains scheduling problems. *Electronics and electrical equipment of transport* 2016;6:13-16. (in Russ.)
17. Sidorenko V.G., Zhuo M.A., Alekseev V.M. [Planning the maintenance of EMUs in conditions of limited resources]. *Russian Electrical Engineering* 2017;12:73-76. (in Russ.)
18. Markevich A.V., Sidorenko V.G. [Automation of labour forces distribution using a genetic algorithm]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* 2019;3(43):36-49. (in Russ.)
19. Sidorenko V.G., Safronov A.I. [Method of equalising metro train spacing intervals in conditions of limited resources]. *Vestnik RGUPS* 2014;2(54):69-76. (in Russ.)
20. Baranov L.A., Vorobiova L.N. [Synthesising the law of centralised metro train traffic management using a simulation model]. *Vestnik MIIT* 2004;11:3. (in Russ.)
21. Sidorenko V.G., Filipchenko K.M., Zhuo M.A. [The effect of the night-time allocation of trains on the operation of metro trains]. *Russian Electrical Engineering* 2016;9:19-25. (in Russ.)
22. Baranov L.A., Kuznetsov N.A., Maksimov V.M. [Power Optimal Traffic Management]. *Russian Electrical Engineering* 2016;9:12-18. (in Russ.)
23. IEC 62290-1:2014. Railway Applications – Urban Guided Transport Management and Command/Control Systems – Part 1: System Principles and Fundamental Concepts. – International Electrotechnical Commission; 2014.
24. Plekhanov P.A. Standardization and Safety Issues for Migration to the Future Railway Mobile Communication System. In: [Proceedings of the Yearly Research and Practice Conference of the A.S. Popov Russian Science and Technology Society for Radio Engineering, Electronics and Telecommunications]; 2021;1(76):219-221. (in Russ.)
25. Ning B., Brebbia C.A., Tomii N. Computers in Railways XII: Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems. Beijing: Beijing Jiaotong University; 2010.
26. Fan W. Reliability analysis of stochastic park-and-ride network. *Journal of Modern Transportation* 2012;1:57-64.
27. Deng L., Zeng Q., Gao W. et al. Optimization of train plan for urban rail transit in the multi-routing mode. *Journal of Modern Transportation* 2011;4:233-239.
28. D'Acerno L., Botte M., Gallo M. et al. Defining Reserve Times for Metro Systems: An Analytical Approach. *Journal of Advanced Transportation* 2018:1-15.
29. Gong C., Zhang S., Zhang F., Jiang J. et al. An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One. *Energies* 2014;7(11):7305-7329.
30. Liu R.R., Golovitcher I.M. Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transport Research. A Policy Practice* 2003;37:917-932.



31. Noah J.G. Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes. *Transp. Research Record: Journal of the Transp. Research Board* 2014;2424:58-65.

32. Turner C., Tiwari A., Starr A. et al. A review of Key Planning and Scheduling in the Rail Industry in Europe and UK. *Rail and Rapid Transit: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F* 2016;230(3):984-998.

33. [Shanghai metro]. [accessed 07.05.2021]. Available at: <http://n-metro.ru/шанхайский-метрополитен/>. (in Russ.)

34. [Metros of the world]. [accessed 07.05.2021]. Available at: <https://stroim.mos.ru/mobile/metro/metropoliteny-mira>. (in Russ.)

35. Degtiarov D.P. [Theory and methods of automated construction of metro train schedules]. Saint Petersburg: PGUPS; 2002. (in Russ.)

36. Sidorenko V.G., Petrov A.S. [Architecture of multi-threaded software for logistical process planning]. *Informatzitsiya obrazovaniya i nauki* 2020;1(45):25-38. (in Russ.)

## Сведения об авторах

**Баранов Леонид Аврамович** – почетный профессор МИИТа, заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, академик Академии Транспорта Российской Федерации, Академии Электротехнических наук Российской Федерации и Инженерной Академии Сербии, заведующий кафедрой «Управление и защита информации» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ПУТ (МИИТ)), доктор технических наук, профессор. *Russian University of Transport (MIIT)*, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: [baranov.miit@gmail.com](mailto:baranov.miit@gmail.com).

**Сафронов Антон Игоревич** – доцент кафедры «Управление и защита информации» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ПУТ (МИИТ)), кандидат технических наук, доцент. *Russian University of Transport (MIIT)*, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: [safronov-ai@mail.ru](mailto:safronov-ai@mail.ru).

**Сидоренко Валентина Геннадьевна** – профессор кафедры «Управление и защита информации» Федераль-

ного государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ПУТ (МИИТ)), доктор технических наук, профессор. *Russian University of Transport (MIIT)*, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: [valenfalk@mail.ru](mailto:valenfalk@mail.ru).

## About the authors

**Leonid A. Baranov**, Professor Emeritus of MIIT, Honoured Scientist of the Russian Federation, winner of the Russian Government's Science and Technology Award, member of the Academy of Transportation of the Russian Federation, the Academy of Electrical Engineering of the Russian Federation, the Engineering Academy of Serbia, Head of Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Doctor of Engineering, Professor, 9, bldg. 9 Obraztsova St., Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: [baranov.miit@gmail.com](mailto:baranov.miit@gmail.com).

**Anton I. Safronov**, Senior Lecturer, Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Candidate of Engineering, Associate Professor, 9, bldg. 9 Obraztsova St., Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: [safronov-ai@mail.ru](mailto:safronov-ai@mail.ru).

**Valentina G. Sidorenko**, Chair Professor, Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Doctor of Engineering, Professor, 9, bldg. 9 Obraztsova St., Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: [valenfalk@mail.ru](mailto:valenfalk@mail.ru).

## Вклад авторов в статью

**Баранов Л.А.** Методика анализа эффективности ликвидации сверхрежимных выдержек в условиях эксплуатации систем управления GoA3 и GoA4.

**Сафронов А.И.** Алгоритм построения планового графика движения поездов без сверхрежимных выдержек, расчет энергоэффективности графика.

**Сидоренко В.Г.** Анализ состояния вопроса, увязка задач планирования движения поездов с графиком оборота электроподвижного состава и графиком работы локомотивных бригад.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.