

# Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения

Леонид А. Баранов<sup>1\*</sup>, Валентина Г. Сидоренко<sup>1</sup>, Екатерина П. Балакина<sup>1</sup>, Людмила Н. Логинова<sup>1</sup>

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

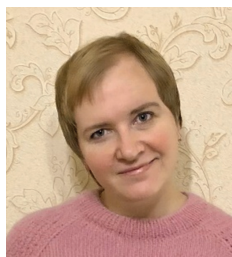
\*baranov.miit@gmail.com



Леонид А. Баранов



Валентина Г. Сидоренко



Екатерина П. Балакина



Людмила Н. Логинова

**Резюме. Цель.** В условиях современных мегаполисов обеспечение повышения использования пропускной способности, увеличение провозной способности линий внеуличного транспорта (метрополитен, скоростной трамвай, пригородные электропоезда, имеющие остановки внутри мегаполиса) при безусловном обеспечении безопасности движения реализуются интеллектуальными системами автоматического управления движением поездов. Целью данной статьи является выбор и обоснование принципов построения и структуры такой системы. **Методы.** Используя методы системного анализа, обоснованы принципы построения и структура системы. Применение генетических алгоритмов позволяет решать задачи автоматизации планирования движения поездов. Методы теории оптимального управления дают возможность выбирать энергоэффективные режимы управления движением поезда по перегону, распределять время хода по линии на времена хода по перегонам по критерию минимума энергозатрат, разрабатывать энергоэффективные плановые графики движения. Методы теории автоматического управления используются при выборе и обосновании алгоритмов управления движением поездов на различных функциональных уровнях, при построении экстраполяторов случайных возмущений, обеспечивающих минимизацию числа остановок поездов на перегонах. **Результаты.** Разработаны и обоснованы принципы построения и структура централизованной интеллектуальной иерархической системы автоматического управления движением поездов внеуличного городского транспорта. Описано распределение функции между уровнями иерархии, приведена совокупность подсистем, реализующих цель управления – обеспечение безопасности движения и комфорта пассажиров. Сформулированы и обоснованы критерии качества управления при компенсируемых и некомпенсируемых возмущениях. Рассмотрены алгоритмы управления движением и автоматизация построения планового графика движения. Показано место алгоритмов принятия решений в условиях неопределенности при использовании прогноза возмущений, генетических алгоритмов при автоматизации планирования движения поездов. Приведено описание принципов построения алгоритмов управления и планирования движения транспортных средств, обеспечивающих уменьшение расхода энергии на тягу поездов. Показана эффективность реализации централизованной интеллектуальной системы управления движением городского внеуличного транспорта, отмечена фундаментальная роль системы для цифровизации транспортного комплекса. **Заключение.** Рассмотренные принципы построения и алгоритмы функционирования системы интеллектуального централизованного управления движением внеуличного городского транспорта показали эффективность этих систем, определяемую следующим: повышение использования пропускной и увеличения провозной способности внеуличного городского транспорта; повышение энергоэффективности планирования и управления движением поездов; повышение безопасности движения; обеспечение оперативного управления движением во время чрезвычайных ситуаций и больших сбоев движения; повышение комфорта пассажиров.

**Ключевые слова:** централизованное управление, автономные системы, интеллектуальное управление, функциональные уровни, подсистемы, энергоэффективность, прогнозирование возмущений, генетические алгоритмы.

**Для цитирования:** Баранов Л.А., Сидоренко В.Г., Балакина Е.П., Логинова Л.Н. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения // Надежность. 2021. №2. С. 17-23. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23>

Поступила 25.02.2021 г. / После доработки 15.04.2021 г. / К печати 21.06.2021 г.

## Введение

К внеуличному городскому железнодорожному транспорту традиционно относятся метрополитен и скоростной трамвай, движущийся по путям, расположенным вне дорог автомобильного движения. Несколько позже к этому виду транспорта стали причислять поезда пригородного движения, имеющие остановки внутри мегаполиса. В частности, в Москве к внеуличному городскому транспорту относят Московское центральное кольцо (МЦК) и центральный диаметр [1, 2]. Учитывая, что организация движения в условиях метрополитена, скоростного трамвая и наземных электропоездов направлена на выполнение одной и той же цели – комфортной и безопасной перевозки пассажиров при достаточной близких технологиях управления, целесообразно на единых принципах разрабатывать централизованную систему управления движением для внеуличного транспорта.

## Централизованное управление движением линии. Функциональные уровни управления. Подсистемы уровней управления

В условиях интенсивного движения, что свойственно городскому внеуличному транспорту мегаполисов, построение автономных беспилотных систем управления транспортными средствами, в которых реализуется автоматическое управление каждым поездом по заранее заданному расписанию (графику движения) не эффективно, так как в этом случае не учитывается положение остальных поездов, движущихся по линии. Взаимное «вредное» взаимодействие поездов имеет место только в том случае, когда начинают влиять на автоматически выбранные режимы движения системы обеспечения безопасности [3]. В отличие от автономных, централизованные системы получают информацию о моментах прибытия и отправления всех поездов по всем станциям, сравнивают эту информацию с заданным плановым графиком движения и вырабатывают команды управления каждому поезду – требуемая длительность стоянки и время хода попереди идущему перегону. Эти команды реализуются беспилотными транспортными средствами. Такой режим работы централизованных систем называется управлением при компенсируемых возмущениях, когда отклонение от планового графика движения может быть парировано имеющимися ресурсами времен хода и длительностей стоянок. Компенсируемые возмущения будем называть «малыми сбоями». В этом случае, когда ресурсов времен хода и длительностей стоянок недостаточно для парирования возмущений, производятся внеплановые обороты составов на станциях с путевым развитием, и, если это необходимо, внеплановое удаление составов с линии в депо, что приводит к изменению парности и порядка следования поездов. Такие ситуации принято называть «большими сбоями» [3, 4, 5]. В случае больших сбоев реализуются алгоритмы

централизованного управления во время сбоя и алгоритм восстановления движения после ликвидации причин сбоя [5, 6], а управление движением осуществляется по оперативному графику. Цель управления после ликвидации причин сбоя – восстановление движения поездов по исходному плановому графику, что дает возможность реализовать требуемую ночную расстановку составов [6, 7]. Таким образом, в централизованной системе можно выделить два функциональных уровня управления: верхний и нижний.

На верхнем уровне в соответствии с плановым или оперативным графиком движения и получаемой информации о прибытии и отправлении поездов вычисляются требуемые времена хода и длительности стоянок для каждого поезда, на нижнем реализуются команды верхнего уровня. Важнейшей функцией управления верхнего уровня является формирование команд оборота составов по конечным станциям, по станциям с нулевым развитием. Передача этих команд осуществляется через систему диспетчерской централизации на устройство станционной централизации, управляющее переводом стрелок. Контроль за работой верхнего функционального уровня осуществляется диспетчерским аппаратом, получающим информацию о поездном положении через систему диспетчерского контроля. Дополнительно диспетчерский аппарат может получать информацию от камер видеонаблюдения, расположенных на станциях, в оборотных пунктах и т.д. Особенно существенна роль диспетчерского аппарата в период больших сбоев. На верхнем функциональном уровне автоматически формируется сценарий управления, согласие на выполнение которого дает диспетчер [6]. Необходим режим, при котором диспетчер берет управление на себя. Безопасность движения поездов обеспечивается системами, использующими рельсовые цепи (система АРС на Московском метрополитене) [8], либо радиоканал (системы типа СВТС) [9]. Преимуществом систем на базе радиоканала является отсутствие квантования положения «хвоста» впереди идущего поезда по пути (позиционирование «хвоста» впереди идущего поезда по занятой рельсовой цепи), уменьшение эксплуатационных расходов на содержание и регулировку аппаратуры рельсовых цепей. Определение положения «хвоста» впереди идущего поезда с точностью до длины защитного участка, определяемого максимальными погрешностями в измерении пути и скорости поездов, в случае использования радиоканала позволяет уменьшить допустимый интервал попутного следования [10], что существенно в условиях интенсивного движения. Вместе с тем системы на базе радиоканала (типа СВТС) не имеют функции контроля целостности рельсов (так называемый «контрольный режим»). Поэтому необходимо при использовании систем типа СВТС иметь дополнительную аппаратуру, реализующую контроль целостности рельсов [10]. Кроме того, при внедрении систем автоматического управления движением на действующих линиях важно обеспечить преемственность при функционировании

систем обеспечения безопасности. Поэтому разработка гибридных алгоритмов и аппаратуры, позволяющей получить преимущества, свойственные системам с рельсовыми цепями и радиоканалом, перспективна. Команды системы обеспечения безопасности пользуются высшим приоритетом.

Верхний функциональный уровень содержит следующие подсистемы:

- подсистема управления при малых сбоях, при больших сбоях, после ликвидации причин сбоя [3];
- подсистема построения планового графика движения и графика оборота составов [11, 12];
- подсистема выбора энергооптимальных режимов управления поездом при заданных временах хода по перегону [13] и энергооптимального распределения времени хода по линии на времена хода по перегонам [14]. Эти результаты используются при построении планового графика движения. Следует отметить, что решение задачи выбора энергооптимальных управлений поездом для различных времен хода позволяет получить для каждого перегона зависимость расхода энергии на тягу как функцию времени хода, которая необходима и достаточна для решения задачи энергооптимального распределения;
- подсистема архивирования диспетчерских приказов и исполненных графиков движения;
- база данных отказов и результатов диагностики технических средств, обеспечивающих движение поездов, в том числе и данные диагностики подвижного состава;
- подсистема автоматического управления оборотом подвижного состава на станциях с путевым развитием;
- подсистема информирования пассажиров;
- подсистема обучения персонала, участвующего в организации движения – программно-аппаратный комплекс для подготовки персонала [15];
- подсистема для повышения квалификации поездных диспетчеров – тренажер поездного диспетчера [16, 17, 18].

Актуальность этих программно-аппаратных комплексов значительно существенней непосредственного предназначения. В составе этих комплексов имеются подробные имитационные модели линии, которые используются при анализе новых алгоритмов. По результатам этого моделирования принимается решение об эффективности их внедрения. В составе тренажера имеется система вычисления критериев качества работы системы управления и открытая библиотека алгоритмов управления. Отдельно следует учесть возможность объединения систем обучения сотрудников различных служб, что позволит использовать общие критерии оценки качества обучения, методологию приведения занятий. Наличие имитационных моделей позволяет использовать методы машинного обучения для прогнозирования опасных отказов различных объектов системы [19].

Отметим ряд особенностей верхнего функционального уровня, которые соответствуют современному

развитию IT технологий и позволяют использовать термин «интеллектуальная система». В алгоритмах верхнего уровня требуется формировать команды для поездов линии в условиях неопределенности: нужно давать команду отправления и требуемое время хода ( $n+1$ )-му поезду таким образом, чтобы реализовать его движение без воздействия ограничений системами обеспечения безопасности. Для выработки этого решения необходимо знание отклонения длительности стоянки от графиковой на следующей станции предыдущего  $n$ -го поезда в то время, когда он при интенсивном движении еще не прибыл на станцию. В этих условиях реализуется интеллектуальный алгоритм прогноза возмущений, использующий статистику задержки предыдущих поездов [20]. При автоматическом построении графика движения поездов и графика оборота используют генетический алгоритм [21, 22]. Следовательно, термин «интеллектуальная система» корректен. Интеграция различных функций в системе – собственно управление, сбор и обработка диагностической информации, анализ показателей функционирования объекта, планирование его работы, ведение архивов и т.д. реализуема при использовании методов Big data, алгоритмов искусственного интеллекта. В свою очередь открытость построения системы, наличие базы данных для сбора диагностической информации позволяет считать ее фундаментом при цифровизации городских транспортных систем.

На нижнем функциональном уровне бортовая система управления решает следующие задачи:

- обеспечивает безопасность движения;
- реализует энергооптимальный режим управления поезда, при котором выполняются все заданные ограничения (в том числе и по сигналам систем безопасности движения), обеспечивает выполнение заданного верхним уровнем времени хода по перегону;
- реализует прицельную остановку поезда на станциях;
- реализует выполнение постоянных и временных ограничений скорости;
- реализует закрытие и открытие дверей вагонов, пуск поезда, оповещение пассажиров.

Исключительно важной задачей, обеспечивающей безопасное и эффективное управление движением, является измерение параметров движения: скорости и пути, пройденного поездом. Эта задача в условиях метрополитена решается с использованием частотно-импульсных датчиков вращения колесной пары и корректирующих датчиков, расположенных на стенке тоннеля, либо на пути. В условиях метрополитена свою эффективность показали ИК-датчики. На стенке тоннеля размещается уголкового отражатель, на поезде – прямо-передатчик инфракрасного сигнала [3]. Луч передатчика направлен в сторону стенки тоннеля. Он отражается от уголкового отражателя и фиксируется на поезде, сбрасывая имеющуюся погрешность при измерении от частотно-импульсного датчика вращения колеса. При расположении двух датчиков на фиксированном расстоянии бортовое



вычислительное устройство рассчитывает радиус колеса, что позволяет уменьшить погрешность при измерении пути и скорости вне точек стробирующего сигнала [3]. Имеется опыт использования RFID-датчиков, расположенных между рельсами. Достоинством этих датчиков является возможность передачи информации о номере датчика, его координате, номере перегона. Вместе с тем из-за колоколообразной диаграммы направленности радиосигнала, положение фиксируемой точки коррекции зависит от скорости движения поезда. Последнее приводит к погрешности позиционирования поезда. Уменьшение скорости движения поезда в точке расположения RFID-датчика при подходе к станции для уменьшения влияния колоколообразной формы сигнала на погрешность фиксации приводит к увеличению времени движения в режиме тяги при постоянном времени хода по перегону и, следовательно, к перерасходу энергии на тягу. В среднем, увеличение времени торможения на 1 секунду вызывает повышение расхода энергии на тягу порядка 1%. Совместное использование двух видов датчиков позволяет повысить надежность тракта измерения пройденного пути и использовать достоинства обоих датчиков: точность фиксации корректирующей точки у ИК-датчика, большой объем передаваемой информации у RFID-датчиков.

Для обнаружения препятствий в условиях беспилотного управления на открытых участках, доступных для людей, животных, других видов транспорта, необходима система технического зрения [23]. Управления, формируемые этой системой, обладают высшим приоритетом.

Наличие современных вычислительных средств на борту поездов позволяет интегрировать функции систем автоматического управления движением поезда, безопасности движения, сбора диагностической информации, которая по радиоканалу передается на станцию и далее на верхний функциональный уровень.

## Повышение энергоэффективности управления

Отдельно остановимся на совершенствовании алгоритмов управления движением верхнего уровня. Основными критериями эффективности на верхнем уровне алгоритма управления движением поездов является:

- повышения точности выполнения планового графика движения при компенсируемых возмущениях;
- минимальное время вхождения в плановый график движения после ликвидации причин большого сбоя.

Минимизация указанных критериев должна быть достигнута с учетом выполнения дополнительного условия – минимизации расхода энергии на тягу поездов.

При беспилотном управлении регулятор времени хода бортовой части системы может в известном диапазоне с высокой точностью реализовать заданное время хода по перегону. Эта возможность используется для повышения энергоэффективности управления при малых сбоях. Требуемое время хода  $(n+1)$ -го поезда попереди

лежащему перегону для компенсации опоздания по прибытию этого поезда на  $(j+1)$ -ю станцию выбирается с учетом ограничений на минимальную длительность стоянки таким образом, чтобы обеспечить допустимый минимальный интервал по ограничениям систем обеспечения безопасности движения. Отличительной особенностью алгоритма управления движением при компенсируемых возмущениях является учет зависимости ограничений от состояния системы и прогноза величин отклонений длительности стоянки впереди идущего поезда по статистике задержек предыдущих поездов [20]. Зависимость ограничений от состояния системы задается регулировочной характеристикой  $j$ -го перегона  $T_{umij}[n+1] = [T_{xy}[n+1], T_{xy}[n]] + T_{cj}[n]$ , где  $T_{umij}[n+1]$  – минимальный интервал отправления  $(n+1)$ -го поезда на  $j$ -ый перегон с  $(j-1)$ -ой станции, при котором отсутствует влияние через систему обеспечения безопасности  $n$ -го на режимы  $(n+1)$ -го поезда;  $T_{xy}[n]$ ,  $T_{xy}[n+1]$  – соответственно времена хода  $n$ -го и  $(n+1)$ -го поезда по  $j$ -ому перегону;  $T_{cj}[n]$  – длительность стоянки  $n$ -го поезда на  $j$ -ой станции. При выборе управления величины  $T_{cj}[n] = T_{cj}^r[n] + \Delta T_{cj}^{np}[n]$  где  $T_{cj}^r[n]$  – длительность стоянки  $n$ -го поезда на  $j$ -ой станции по плановому графику;  $\Delta T_{cj}^{np}[n]$  – прогнозируемое отклонение фактической длительности стоянки от плановой. Время хода  $(n+1)$ -го поезда по  $j$ -ому перегону выбирается алгоритмом таким образом, чтобы при обеспечении требований по величине  $T_{umij}[n]$  было реализовано ограничение по допустимой минимальной длительности стоянки и минимально возможные опоздания  $(n+1)$ -го поезда на  $j$ -ую станцию. При этом уменьшается число ограничений скорости и остановок сзади идущего поезда на перегоне. Такой алгоритм, с одной стороны, повышает безопасность движения за счет уменьшения вероятности опасного сближения поездов, с другой – уменьшает расход энергии на тягу не только за счет уменьшения числа остановок на перегоне, но и за счет увеличения времени хода сзади идущего поезда.

Алгоритм управления после ликвидации причин большого сбоя выбирают из множества алгоритмов управления, обеспечивающих максимальное быстрое действие, тот, который минимизирует расход энергии на тягу, за счет энергооптимального распределения времен хода по участку на времена хода по перегону. Проблема энергоэффективности учитывается при планировании движения поездов не только, как указывалось ранее, путем оптимального распределения времени хода, по линии на времени ход по перегонам, но и за счет изменения способа увеличения числа поездов на линии при переходе к часам «пик». В традиционных плановых графиках движения в переходных режимах использовались «сверхрежимные» стоянки, обеспечивающие увеличение интервала между поездами для вывода на линию дополнительного поезда. В рассматриваемом алгоритме планирования тот же эффект достигается плановым увеличением времен хода, что определяет уменьшение расхода энергии на тягу. Таким образом, энергоэффективность плановых графиков движения

поездов достигается использованием зависимостей расхода энергии на тягу поездов от времени хода по перегону при выбранных энергооптимальных режимах управления, распределением времени хода по линии на времена хода по перегонам по критерию минимума расхода энергии, заменой в переходных режимах «сверхрежимных» стоянок увеличенными временами хода по перегону.

Построение сетей передачи информации в централизованной системе управления, вопросы защиты информации являются исключительно важными и определяющими эффективность работы системы. Эти вопросы не затрагиваются в данной статье и требуют отдельного рассмотрения.

## Структура системы управления движением внеуличным городским транспортом мегаполиса

Выше была рассмотрена система управления движением на линии внеуличного городского транспорта. Объединение таких систем с дополнением этого объединения более высоким уровнем управления иллюстрируется на рис. 1, где приняты следующие обозначения:

- ЦСУ – центр ситуационного управления;
- ЦСУДПМ линии 1, ...,  $N$  – централизованная система управления движением поездов метрополитена от 1-ой до  $N$ -ой линии;
- ЦСУДСТ линии 1, ...,  $M$  – централизованная система управления движением скоростного трамвая от 1-ой до  $M$ -ой линии;
- ЦСУДПЦК – централизованная система управления движением поездов центрального кольца (в Москве МЦК);
- ЦСУДПЦД – централизованная система управления движением поездов центральных диаметров от 1 до  $K$ .

Центры ситуационного управления (ЦСУ) для различных видов городского внеуличного транспорта получают информацию от подсистем верхнего функционального уровня централизованного управления движением поездов, в частности, от программно-аппаратных комплексов диспетчерского аппарата линий. В штатном режиме получаемая информация «сжимается» и в обобщенном виде поступает на устройства отображения центров ситуационного управления. При отклонении движения поездов от планового графика на фиксированную вели-

чину изменением цвета изображения линии и звуковым сигналом этот факт сообщается сотрудникам центра, которые могут вызвать подробные изображения поездного положения, доступного диспетчеру линии. Разработка функций центра ситуационного управления и принципы его построения были разработаны сотрудниками РУТ (МИИТ) и Московского метрополитена [24]. Обобщенная информация с ЦСУ различных видов внеуличного городского транспорта поступает в центр управления внеуличным транспортом мегаполиса. На этом уровне получаемая информация позволит оперативно управлять городским транспортом в случае чрезвычайных ситуаций, заранее принимать согласование управленческих решений при плановом закрытии тех или иных участков линий. Городской центр управления внеуличным транспортом должен быть связан с центрами управления других видов транспорта. Концепция его построения требует существенной проработки.

## Заключение

Рассмотренные принципы построения и алгоритмы функционирования системы интеллектуального централизованного управления движением внеуличного городского транспорта показали свою эффективность, определяемую следующим:

- повышение использования пропускной и увеличения провозной способности внеуличного городского транспорта за счет точного выполнения планового графика движения поездов;
- повышение энергоэффективности планирования и управления движением поездов за счет выбора энергоэффективных режимов управления поездами, оптимального по критерию минимума энергозатрат на тягу, распределения времени хода поездов по линии на времена хода по перегонам, замены планового графика движения поездов со «сверхрежимными» стоянками на график с изменением плановых времен хода поездов по перегонам в период смены парности движения, совершенствования алгоритмов централизованного управления, учитывающего зависимость ограничений на управление от состояния системы и прогноз возможных возмущений, увеличения времени хода поездов по перегону для реализации допустимого межпоездного интервала движения по системам обеспечения безопасности движения;

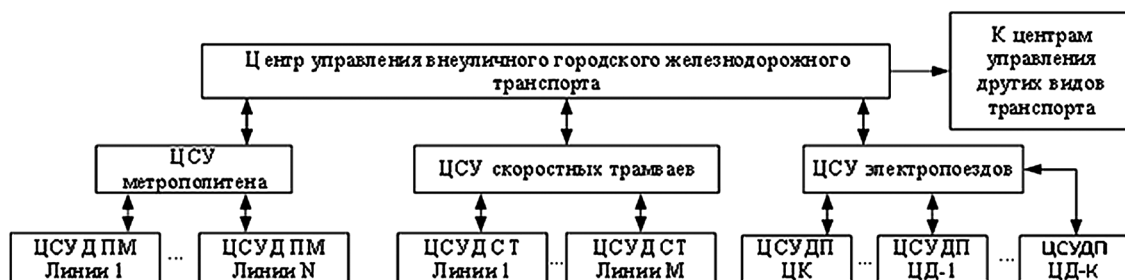


Рис. 1. Структура системы

- повышение безопасности движения за счет уменьшения вероятности «опасного» сближения поездов при более точном выполнении времен хода поездов по перегонам и длительностей стоянок;

- оперативное управление движением во время чрезвычайных ситуаций и больших сбоев движения за счет разработки эффективных алгоритмов централизованного управления во время сбоев движения и после окончания причин сбоя;

- повышение комфорта пассажиров за счет точного выполнения графика движения.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund “Talent and success”, project number 20-37-51001.

## Библиографический список

1. Пассажиропоток МЦД достиг 550 тысяч человек в сутки // Городской информационный канал m24.ru. URL: <https://www.m24.ru/news/transport/07122019/99787> (дата обращения 18.03.2020).
2. Роменский Д.Ю., Вакуленко С.П., Козлов А.В. Выбор концептуального решения по организации диаметральных пригородно-городских перевозок в Московском ж.д. узле / Молодые ученые – развитию национальный технологический инициативы (поиск). 2020. №1. С. 568-570.
3. Баранов Л.А. Современные микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. М.: Транспорт, 1990. 272 с.
4. Баранов Л.А., Козлов В.П. Управление линией метрополитена во время сбоя движения // Вестник ВНИИЖТ’а. 1992. №5. С. 29-31.
5. Балакина Е.П. Принципы построения алгоритмов системы поддержки принятия решений поезвному диспетчеру // Наука и техника транспорта. 2008. № 2. С. 23-26.
6. Балакина Е.П. Автоматика выполняет функции диспетчера // Мир транспорта. 2008. № 2. С. 104-109.
7. Балакина Е.П., Щеглов М.И., Ерофеев Е.В. Алгоритм оперативного управления линией метрополитена для восстановления движения по плановому графику // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 23-25.
8. Бестемьянов П.Ф., Романчиков А.М. Контроль движения при координатном регулировании // Мир транспорта. 2008. № 1. С. 104-108.
9. IEEE 1474.1-2004 – IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, 2004.
10. Баранов Л.А. Оценка интервала попутного следования электропоездов для систем безопасности на базе радиоканала // Мир транспорта. 2015. № 2. С. 6-14.
11. Сидоренко В.Г., Сафронов А.И. Построение планового графика движения для метрополитена // Мир транспорта. 2011. № 3. С. 98-105.
12. Исаков Т.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г., Чжо М.А. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена // Автоматика на транспорте. 2020. № 1. Том 6. С. 38-63.
13. Баранов Л.А., Мелешин И.С., Чинь Л.М. Энергооптимальное управление движением поезда с рекуперативным тормозом при учете ограничений на фазовую координату // Наука и техника транспорта. 2010. № 4. С. 12-23.
14. Баранов Л.А., Кузнецов Н.А., Максимов В.М., Энергооптимальное управление транспортных средств // Электротехника. 2016. № 9. С. 12-18.
15. Логинова Л.Н. Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения // Наука и техника транспорта. 2011. № 1. С. 62-65.
16. Баранов Л.А., Сидоренко В.Г. Применение тренажеров для повышения квалификации работников службы движения // Автоматика, связь и информатика. 2003. № 2. С. 17-20.
17. Баранов Л.А., Сидоренко В.Г. Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена // Железные дороги мира. 2002. № 8. С. 64-69.
18. Баранов Л.А., Балакина Е.П., Сидоренко В.Г. Тренажеры поездных диспетчеров рельсового транспорта // Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». М.: МИИТ, 2017. С. VII-4.
19. Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б., Игнатов А.Н., Платонов Е.Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 45-53.
20. Баранов Л.А., Балакина Е.П., Иконников С.Е., Антонов Д.А. Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса // Наука и техника транспорта. 2020. № 1. С. 30-38.
21. 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.
22. 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.
23. Охотников А.Л. Системы технического зрения: тенденции развития // Железнодорожный транспорт. 2020. № 9. С. 44-51.

24. Ершов А.В. Принципы построения ситуационного центра на Московском метрополитене // Наука и техника транспорта. 2006. № 1. С. 27-33.

### Сведения об авторах

**Леонид Аврамович Баранов** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: baranov.miit@gmail.com

**Валентина Геннадьевна Сидоренко** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: valenfalk@mail.ru

**Екатерина Петровна Балакина** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: balakinaep@gmail.com

**Людмила Николаевна Логинова** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: ludmilanv@mail.ru

### Вклад авторов в статью

**Баранов Л.А.** Принципы построения системы, задачи энергоэффективности.

**Сидоренко В.Г.** Задачи планирования движения поездов, генетические алгоритмы.

**Балакина Е.П.** Задачи прогнозирования возмущений. Алгоритмы управления при больших сбоях движения.

**Логинова Л.Н.** Алгоритмы управления движением при компенсируемых возмущениях.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.