

Информационное сопряжение устройств автоматической переездной сигнализации с интеллектуальной системой управления светофорами на близлежащих перекрестках



Д. В. Ефанов,
д-р техн. наук, профессор
Высшей школы транспор-
та Института маши-
ностроения, материалов
и транспорта Санкт-
Петербургского политех-
нического университета
Петра Великого (СПбПУ),
профессор кафедры
автоматики, телемеха-
ники и связи на железно-
дорожном транспорте
Российского университета
транспорта (МИИТ),
ведущий научный сотруд-
ник лаборатории проблем
организации транспорт-
ных систем Института
проблем транспорта
им. Н. С. Соломенко РАН



А. С. Кашталинский,
канд. техн. наук,
доцент Высшей школы
транспорта Института
машиностроения,
материалов и транспорта
СПбПУ



Е. И. Елина,
аспирант СПбПУ

Одними из наиболее уязвимых мест как в железнодорожной, так и в автодорожной транспортных системах, являются переезды. Снижение аварийности на пересечении железных и автомобильных дорог за счет применения новых автоматизированных систем — задача первостепенной важности.

Проблема безопасности движения по переездам посвящены тысячи научных публикаций по всему миру, например, работы [1–3]. На состояние дел в этой области изначально влияют установившиеся парадигмы обеспечения безопасности движения и поездов, и автомобильного транспорта. На железных дорогах поезд обособливается от внешних транспортных систем, и все методы достижения безопасности базируются на четком выполнении алгоритмов движения с учетом действующих сигналов. Это касается систем как со светофорным регулированием, так и с бес-светофорным, применяемым при организации движения на высокоскоростных линиях железных дорог [4].

Фактически свойство безопасности движения поезда достигается за счет исключения человеческого фактора в принятии решения на само движение и его скорость, а также за счет блокирования внешних дестабилизирующих факторов. Ввиду наличия одновременно на конкретном участке железной дороги единственного поезда, следующего в одном направлении, а также разделения поездов в пространстве средствами сигнализации, централизации и блокировки такая парадигма успешно позволяет достигать высоких показателей безопасности.

На автодорожном транспорте безопасность движения отдана на откуп водителей транспортных средств, которые при-

нимают решение на движение в той или иной дорожной ситуации с учетом действующих знаков и сигналов. При этом, если на железных дорогах нарушения указаний сигнализации считаются особо опасными и блокируются бортовыми средствами управления, а также являются в некотором смысле бесполезными, так как не позволяют поезду каким-то образом поменять позицию относительно других поездов, то на автодорожном транспорте нарушения указаний знаков и сигналов — регулярные действия водителей.

При этом создаются угрозы иным транспортным средствам, пассажирам и пешеходам. Особой проблемой в этой связи оказываются железнодорожные переезды, на которых действия водителей автотранспортных средств могут спровоцировать и нарушения безопасности движения поездов. Здесь речь идет даже не про свершившийся факт аварии или катастрофы, а про создание угрозы безопасности, что считается опасным отказом [5].

На водителей автотранспортных средств влияют различные дестабилизирующие факторы, включая психологическое состояние. Со стороны железной дороги переезд ограждается от движения автомобилей техническими средствами автоматизации при приближении поезда. Сюда входят, в зависимости от категории переезда: светофоры, автошлагбаумы, устройства заграждения пути, барьерные шлагбаумы [6]. Несмотря на это, опасные

отказы в работе переездов не исключены. Здесь случаются и отказы самих средств автоматизации [7, 8], и нарушения правил движения через переезды водителями автотранспортных средств. Последние случаи наиболее часты, так как действует «человеческий фактор».

В [9–11] предложено для информирования водителей автотранспортных средств, подъезжающих к железнодорожным переездам, передавать прогнозные значения времени, через которое произойдет закрытие переезда, а также времени его открытия для учета в навигационных системах. Такое техническое решение требует предварительного получения данных о движении поезда еще до того, как сработают устройства извещения со стороны железнодорожной линии для ограждения переезда. Всякий раз устройства ограждения срабатывают заблаговременно еще до появления поезда непосредственно на нем, однако водители и навигационные системы уже имеют прогнозную информацию, что позволяет изменить маршруты движения. Этим можно корректировать время в пути для автомобильного транспорта, а также косвенно влиять на безопасность движения по переезду для всех участников.

Исследования авторов показывают, что информационное сопряжение устройств автоматической переездной сигнализации с интеллектуальными системами управления светофорами на близлежащих перекрестках позволяет сократить время движения транспортных средств через переезд.

Структура схемы информационного сопряжения

Железнодорожный переезд закрывается для движения транспорта заблаговременно. На время срабатывания переездной сигнализации при расчете длин участков извещения по обоим направлениям движения поездов влияют такие параметры, как ширина переезда, междупутья и колеи, расстояние от наиболее удаленного шлагбаума до крайнего рельса, максимальная длина автотранспорта (в расчетах принимается 24 м), расстояние от шлагбаума до линии остановки автотранспорта (5 м), расчетная скорость автотранспорта (8 км/ч), максимальные скорости движения поездов в каждом из направлений, время срабатывания устройств извещения и управления, гарантийное время (10 с), ускорение движения [12]. По результатам расчетов определяются временные параметры для срабатывания устройств

ограждения на переездах, а также точка начала извещения о закрытии переезда для движения автомобильного транспорта и точка открытия переезда.

Работа железнодорожного транспорта изолирована от работы автодорожной транспортной системы. Светофоры на регулируемых перекрестках никак не могут получать данные о работе устройств переездной автоматизации и учитывать их в собственных режимах. Однако, как показывают исследования авторов, для близлежащих к переездам перекрестков информация о времени срабатывания устройств ограждения на переездах может улучшить временные параметры проследования автомобильного транспорта через переезд при включении постоянного красного сигнала для проезда перекрестка в сторону дороги, пересекающей железнодорожные пути. Поэтому целесообразно информационное сопряжение устройств автоматической переездной сигнализации.

На рис. 1 изображена упрощенная схема информационного сопряжения устройств автоматической переездной сигнализации с интеллектуальной системой управления светофорами на близлежащих перекрестках. В системе сопряжения требуется получить информацию о срабатывании включающего реле В или его повторителя ПВ. При свободности участка приближения к переезду они находятся под током, а при занятии — выключаются. Поэтому данные о замыкании общих и тыловых, а также общих и фронтовых контактов одного из этих реле требуются для передачи их в интеллектуальную систему управления светофором на автомобильной дороге. Требуется сформировать значение одной логической переменной: $y = 1$ — во включенном состоянии реле (замкнуты общие и фронтовые контакты) и $y = 0$ — в выключенном (замкнуты общие и тыловые контакты).

Значение переменной необходимо передать по беспроводной связи посред-

ством контроллера со встроенным радиопередатчиком через базовую станцию на устройства управления контроллерами интеллектуальной системы (контроллеры светофоров (КС) на рис. 1) на близлежащем перекрестке автомобильных дорог. При значении $y = 0$ включается динамический режим светофоров, а при $y = 1$ светофоры работают в стандартном режиме.

Отметим, что помимо прямого подключения в цепи сигнализации, централизации и блокировки, значение логической переменной y можно получить из системы диспетчерского контроля, если она используется на участке железнодорожной линии на рассматриваемом переезде [13].

На рис. 1 условно показано расположение оборудования на двухпутном участке железной дороги: условно обозначенные датчики π_1 и π_2 отвечают за срабатывание извещения о приближении и включение средств ограждения на переезде, аналогично условно показанные датчики π_3 и π_4 отвечают за выключение средств ограждения (физически — это разные концы рельсовых цепей). Данные по кабелю передаются в релейный шкаф автоматической переездной сигнализации (РШ АПС), а затем через средства безопасного подключения к реле В или ПВ (или возможного их повторителя) — к устройству фиксации логической переменной y и радиопередающему устройству.

Такая простая увязка устройств автоматической переездной сигнализации и интеллектуальной системы управления светофорами на перекрестках автомобильных дорог позволяет менять режимы их работы в зависимости от срабатывания устройств ограждения. Это существенно расширяет возможности интеллектуальных систем управления светофорами и позволяет менять параметры трафика, тем самым снизив и время проследования через переезд. Покажем это на примерах в имитационном моделировании движения поездов и автомобильного транспорта.

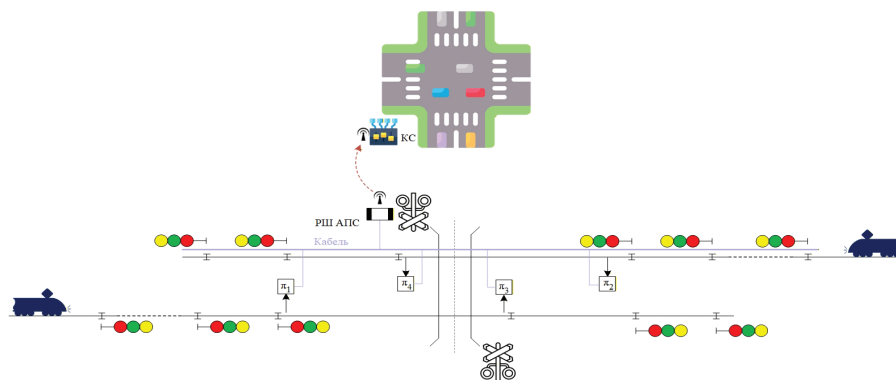


Рис. 1. Упрощенная схема информационного сопряжения

Имитационное моделирование движения на автомобильных дорогах с учетом данных о времени срабатывания устройств ограждения на переездах

В эксперименте анализировались возможности адаптации работы светофоров на перекрестках автомобильных дорог с учетом включения устройств ограждения железнодорожного переезда (когда будет закрыт и когда откроется для движения автомобильного транспорта). При этом реализовывался динамический режим работы светофоров в зависимости от получаемого сигнала о закрытии переезда.

Основная идея заключается в динамической адаптации работы светофоров в зависимости от состояния переезда: при его закрытии движение по автодороге, пересекающей железнодорожные пути, полностью останавливается (постоянный красный сигнал), в то время как на перпендикулярном направлении сохраняется зеленый. После открытия переезда для движения автотранспорта перекресток возвращается к стандартному режиму поочередного пропуска транспортных потоков. Для повышения гибкости управления также рассматривался адаптивный режим, при котором детекторы транспорта в реальном времени анализируют загруженность перекрестка и автоматически продлевают разрешающий сигнал при наличии очереди перед стоп-линией. Это позволяет минимизировать простои и сократить задержки транспортных средств.

Для моделирования базовым выбран четырехсторонний перекресток, на каждом подходе которого имеется по четыре полосы движения (2+2). Интенсивность движения задана одинаковая на всех подходах — 1000 ед./ч. Ее распределение по направлениям движения также одинаково, в пропорции: 20% — направо, 70% — прямо, 10% — налево. На рис. 2 представлен скриншот модели в среде моделирования SUMO (Simulation of Urban MObility), позволяющей детально проанализировать поведение транспортных потоков при различных сценариях [14].

Исследование включало три ключевых варианта управления:

- режим I (базовый) — стандартное светофорное регулирование без учета состояния переезда. Длительность цикла — 72 с, продолжительность основных тактов — по 30 с, промежуточных — по 6 с. Светофорный объект работает в жестком режиме независимо от закрытия переезда.
- режим II с приоритетизацией при закрытом переезде — запрет движения по

направлению, пересекающему железнодорожные пути, на время прохождения поезда.

- режим III (адаптивное управление) — комбинация второго варианта с динамическим продлением зеленого сигнала на основе данных детекторов транспорта.

Дополнительно варьировались длина переезда, его скорость и количество путей, что позволило оценить влияние этих факторов на транспортные задержки. Выбраны следующие исходные данные:

- длина поезда: 200 м (электричка), 400 м (пассажирский поезд), 900–1500 м (грузовой поезд);
- скорость поезда — от 20 до 120 км/ч;
- участок железнодорожной линии является двухпутным (обобщенный случай): моделировалось движение двух поездов, следующих во встречных направлениях по разным путям с интервалами между ними в 60, 120, 180, 240, 300 и 360 с;
- расстояние между переездом и регулируемым перекрестком — 50 м.

Такой подход позволил не только оценить эффективность предложенного метода интеграции устройств автоматической переездной сигнализации и интеллектуальной системы управления автодорожным транспортом в различных условиях, но и выявить оптимальные параметры адаптивного управления для минимизации времени ожидания автотранспортных средств.

Эффект от внедрения предлагаемого режима регулирования на светофорном объекте возникает за счет исключения холостого простоя автотранспорта на дороге, пролегающей параллельно железнодорожным путям, возникающего в период закрытия переезда из-за включения разрешающего сигнала по направлению, перпендикулярному железной дороге, в то время как движение по нему не осуществляется ввиду закрытого состояния переезда. Этот эффект достигается за счет постоянного включения разрешающего сигнала на автодороге, расположенной параллельно железнодорожным путям. Кроме того, использование адаптивного изменения длительности фаз на перекрестке позволяет дополнительно сократить задержки автотранспорта при разъезде очереди после открытия переезда.

Анализ результатов моделирования показал, что применение приоритетизации на переезде совместно с локальным адаптивным управлением на регулируемом пересечении позволяет сократить задержки автотранспорта на величину более 30% в зависимости от времени закрытия пе-

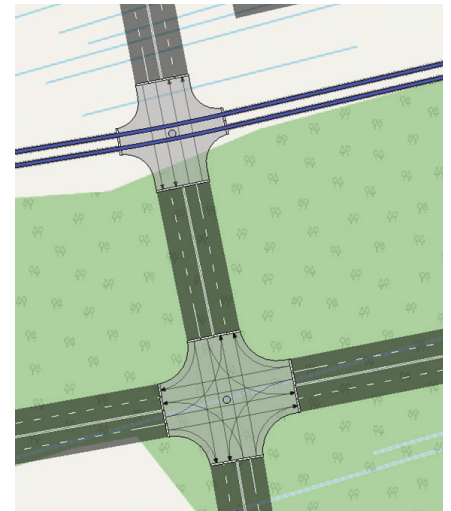


Рис. 2. Фрагмент участка сети в среде SUMO

реезда, которое зависит от скорости движения и длины поезда. Зависимости уровня задержек от этих параметров представлены на рис. 3. Эффект для автомобильного транспорта тем выше, чем дольше время закрытия переезда.

Эксперимент для движения двух поездов навстречу друг другу по двухпутному участку проводился для разных вариантов поездов, их скоростей и длин в соответствии с порядком, приведенным в табл. 1. Всего для двухпутного участка проведено 36 экспериментов.

На основе результатов имитационного моделирования для исходных данных (табл. 1) получена зависимость снижения средней задержки автотранспорта от применяемого режима управления на переезде и регулируемом перекрестке. Показатель средней задержки автотранспорта для каждого проведенного эксперимента определялся программным образом на основе созданной имитационной модели в среде SUMO.

Анализ эффективности предлагаемого метода управления на смежных переезде и регулируемом перекрестке, основанного на фиксации моментов закрытия и открытия переезда для движения автотранспорта, позволяет существенно сократить задержки автотранспорта на величину до 45% в зависимости от параметров движения поезда. На рис. 4 и 5 показатели средней задержки транспорта на автомобильных дорогах сравниваются между собой.

Результаты эксперимента демонстрируют значительное снижение задержек при использовании динамического регулирования, особенно в условиях интенсивного движения и частого закрытия переезда.

Кроме того, для оценки эффективности предлагаемого метода управления светофорами в зависимости от расстояния меж-

Таблица 1. Результаты оценки задержек автотранспорта по итогам проведения экспериментов для двухпутного движения на основе имитационного моделирования

Поезд 1 (тип, длина, скорость)	Поезд 2 (тип, длина, скорость)	Сдвиг времени проезда, с	Задержка транспортных средств для разных режимов, с			Время закрытия переезда для разных режимов, с			Примечание
			I	II	III	I	II	III	
Электричка (200 м, 60 км/ч)	Электричка (200 м, 60 км/ч)	60	72,49	65,37	53,67	218	217	211	Минимальный сдвиг, одинаковые типы поездов
Грузовой (900 м, 20 км/ч)	Грузовой (900 м, 20 км/ч)	360	188,66	124,39	104,22	485	447	461	Максимальный сдвиг, длинные поезда
Грузовой (900 м, 20 км/ч)	Грузовой (900 м, 20 км/ч)	180	187,99	123,17	106,04	447	438	430	Средний сдвиг, длинные поезда
Пас. (400 м, 80 км/ч)	Пас. (400 м, 80 км/ч)	180	84,4	83,56	47,56	317	305	250	Средний сдвиг, средние параметры
Электричка (200 м, 120 км/ч)	Грузовой (900 м, 30 км/ч)	120	104,81	73,03	59,64	283	282	274	Максимальная и минимальная скорости, разные поезда
Грузовой (900 м, 50 км/ч)	Пас. (400 м, 100 км/ч)	240	111,37	92,6	63	321	287	271	Разные длины и скорости
Пас. (400 м, 70 км/ч)	Электричка (200 м, 90 км/ч)	300	90,66	85,34	54,25	311	308	281	Среднее смещение, разные типы поездов
Грузовой (900 м, 20 км/ч)	Электричка (200 м, 110 км/ч)	60	77,36	64,06	48,94	238	229	221	Минимальное смещение, разные типы поездов
Электричка (200 м, 100 км/ч)	Пас. (400 м, 60 км/ч)	180	94,26	82,63	56,43	309	305	253	Средний сдвиг, разные скорости
Пас. (400 м, 90 км/ч)	Грузовой (900 м, 120 км/ч)	360	117,71	78,45	62,94	320	290	300	Максимальное смещение, максимальная разница во времени
Грузовой (900 м, 110 км/ч)	Грузовой (900 м, 30 км/ч)	120	99,74	73,03	68,67	291	282	274	Одинаковая длина, но разная скорость
Грузовой (1500 м, 20 км/ч)	Грузовой (900 м, 20 км/ч)	120	135,84	101,95	86,06	367	358	350	Средний сдвиг, длинные поезда, низкая скорость

ду переездом и перекрестком проведены эксперименты, позволяющие оценить степень сокращения задержек при расстоянии между переездом 50, 150 и 250 м при движении двух поездов: электрички длиной 200 м, движущейся со скоростью 120 км/ч, и грузового поезда длиной 900 м, движущегося со скоростью 30 км/ч. При указанных условиях время закрытия переезда составляет 283 с. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

В ходе исследований установлено, что при указанных условиях движения поездов увеличение расстояния между переездом и регулируемым перекрестком приводит к снижению эффективности предлагаемого метода управления светофорами вплоть до полного отсутствия его эффективности при расстоянии 250 м и более. Это обусловлено увеличением буферной зоны перед переездом, которая служит для накопления очереди транспортных средств, что приводит к меньшему влиянию на эффективность разъезда транспорта на регулируемом пересечении. Вместе с тем при увеличении длительности закрытия переезда

Таблица 2. Результаты оценки задержек транспорта в зависимости от расстояния между переездом и регулируемым перекрестком

Расстояние между переездом и перекрестка, м	Средняя задержка, с/авт.		Эффект	
	Режим I	Режим III	Абсолютный, с/авт.	Относительный, %
50	104,81	59,64	45,17	43,1
150	75,56	48,88	26,68	35,31
250	50,55	55,76	-5,21	-10,31

предлагаемый метод, несомненно, будет демонстрировать увеличение эффективности по сравнению со стандартным методом организации движения на переезде и перекрестке.

Заклучение

Интеграция устройств автоматической переездной сигнализации с интеллектуальными системами управления светофорами на близлежащих перекрестках позволяет оптимизировать параметры движения на автомобильных дорогах. Предложенное решение по информационному сопряжению является простым и не требует значительных затрат на реализацию, содержит минимальное коли-

чество устройств, подключаемых к цепям сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах, в качестве которых можно использовать дополнительные повторители включающих реле и контроллеры для фиксации значения одной логической переменной и передачи ее по радиоканалу в интеллектуальную систему управления светофорами на близлежащих перекрестках.

Представленные результаты исследования подтверждают, что интеллектуальное управление светофорами на перекрестках, расположенных вблизи к железнодорожным переездам на расстоянии до 250 м, способно улучшить пропускную способность дорожной сети,

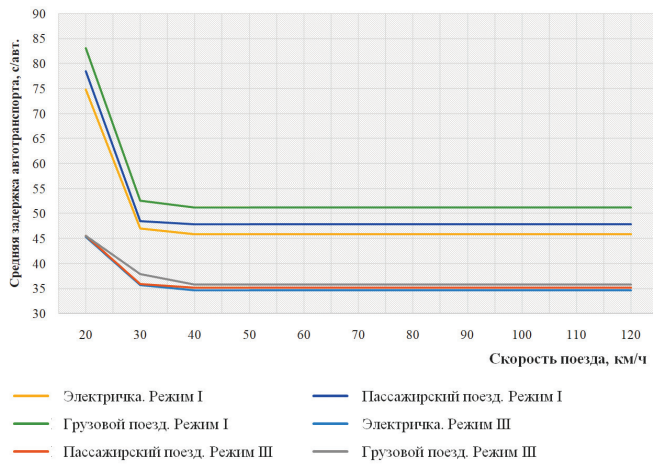


Рис. 3. Зависимость средней задержки автотранспорта от скорости движения и типа поезда

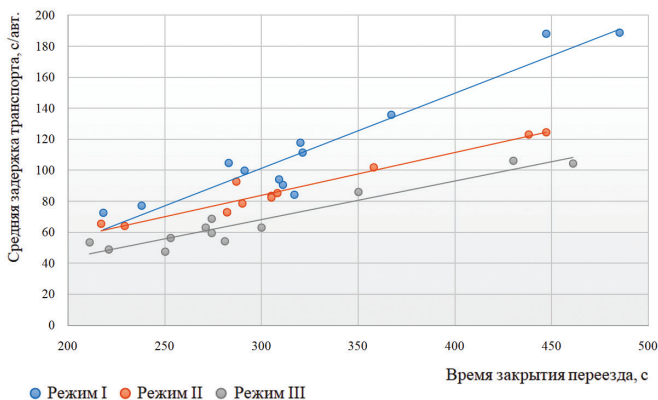


Рис. 4. Показатели задержки транспорта по трем режимам

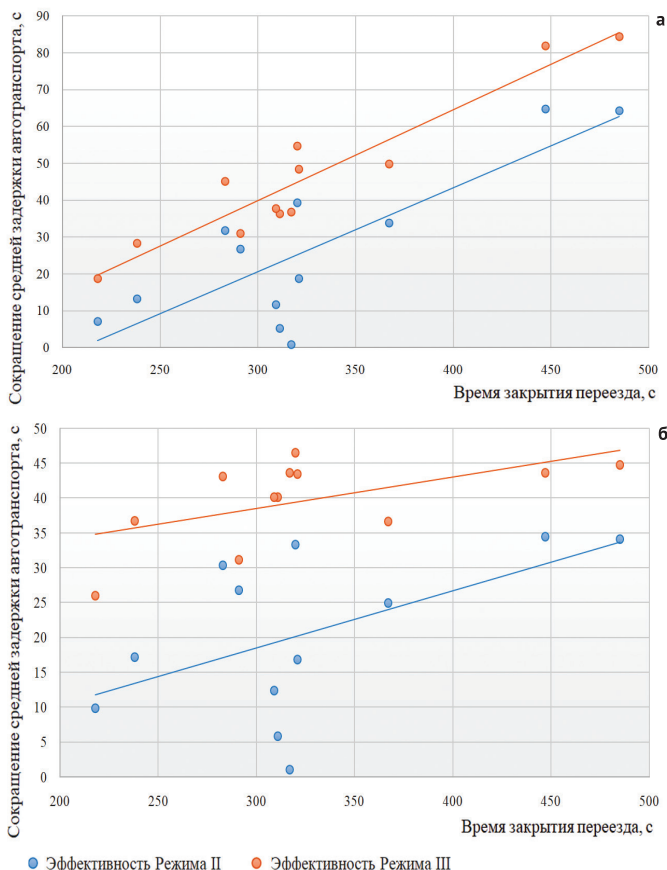


Рис. 5. Показатели сокращения средней задержки автотранспорта в зависимости от времени закрытия переезда

снизить необоснованные задержки автотранспорта и повысить комфорт участников дорожного движения.

Дальнейшие исследования в области тесной интеграции разнородных транспортных систем могут выработать эффективные технические решения к их совершенствованию, в том числе с позиции сокращения времени в пути и повышения безопасности движения с учетом прогнозных времен срабатывания устройств ограждения на железнодорожных переездах.

Литература

1. Anagnostopoulos A. Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis // Future Transportation. 2025. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–17. DOI: 10.3390/futuretransp5010024.
2. Трунаев А. М. Способы и средства повышения безопасности на железнодорожных переездах, перспективы их развития // Транспорт Российской Федерации. 2025. № 4 (119). С. 33–37.
3. Dimitrova E., Dimitrov V., Dimitrova D. Analysis of Failures of Automatic Level Crossing Devices // Engineering Proceedings. 2025. Vol. 104. Iss. 1. P. 1–9. DOI: 10.3390/engproc2025104018.
4. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. 552 p.
5. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / под ред. Вл. В. Сапожникова. М.: Транспорт, 1995. 272 с.
6. Сапожников В. В., Кокурин И. М., Кононов В. А. и др. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2006. 247 с.
7. Ефанов Д. В., Лыков А. А., Глух Е. А. Модернизация схемных решений переездной автоматики при организации высокоскоростного сообщения // Транспорт Урала. 2017. № 1. С. 45–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-45-51.
8. Efanov D., Lykov A., Osadchy G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), September 29 October 2 2017, Novi Sad, Serbia. 2017. P. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.
9. Ефанов Д. В., Плотников Д. Г., Осадчий Г. В. Сервис прогнозирования временных параметров работы железнодорожного переезда // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 4. С. 31–36.
10. Efanov D., Plotnikov D., Osadchy G. Prognosis Service for Navigation Systems Regarding Time Parameters of Railroad Crossing // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), 14–17 September 2018, Kazan, Russia. P. 201–208. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524770.
11. Ефанов Д. В., Плотников Д. Г., Осадчий Г. В. Система прогнозирования состояния переезда для мобильных навигационных устройств // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 9. С. 15–19.
12. Василенко М. Н., Тележенко Т. А., Валиев С. И. Автоматизация расчета параметров перегонной переездной сигнализации // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2010. № 3 (24). С. 54–62.
13. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2. № 1. С. 65–80.
14. Bieker L., Krajewicz D., Morra A. et al. Traffic Simulation for All: A Real World Traffic Scenario from the City of Bologna // Modeling Mobility with Open Data. Lecture Notes in Mobility. Springer, Cham. 2015. P. 47–60. DOI: 10.1007/978-3-319-15024-6_4.