

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ В ТРАМВАЙНЫХ СИСТЕМАХ

**ГОРЕВ Андрей Эдливич**, д-р экон. наук, профессор; e-mail: a-gorev@mail.ru

**ПОПОВА Ольга Валентиновна**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: o-popova@mail.ru

**ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: dg-plotnikov@mail.ru

**ОЛЕЩЕНКО Елена Михайловна**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: oleshchenko.elena@mail.ru

Высшая школа транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Описываются составляющие эффекта, который может быть получен при внедрении автономного управления подвижным составом в трамвайных системах городского транспорта. Составляющие эффекта рассматриваются в зависимости от уровня автоматизированного управления, принятого в отечественной и международной нормативной документации. В статье анализируются данные по времени движения между остановочными пунктами трамвайного маршрута в различные периоды времени. Уровень затрат рассчитывается по четырем сценариям: 1) трамвай не имеет систем автоматизированного управления; 2) трамвай оснащен системой автоматизированного управления с высоким уровнем автоматизации, путь максимально изолирован от автомобильного движения с приоритетом проезда светофоров и по-прежнему в нем присутствует водитель; 3) аналогично предыдущему, но трамвай оснащен системой автоматизированного управления с полным уровнем автоматизации (без водителя); 4) аналогично предыдущему, но без модернизации инфраструктуры. На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что, используя трамвайные вагоны с автоматизированной системой управления, перевозчик может получить эффект от снижения эксплуатационных затрат за счет уменьшения времени проезда трамваями обратного рейса и, как следствие, сокращения требуемого количества трамваев для выполнения того же объема транспортной работы и от снижения эксплуатационных затрат, в связи с отсутствием необходимости использования водителя, даже при том, что стоимость приобретения трамваев, оборудованных средствами автоматизации, значительно повышается. Однако максимальный эффект от внедрения автоматизированного управления можно получить в синергии двух вышеперечисленных эффектов.

**Ключевые слова:** автономное управление, трамвайное движение, эффективность управления, автоматизированная система управления, автоведение, трамвайный маршрут

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-32-51

### ▼ Введение

Все исследования последних лет констатируют, что для пассажира одним из важнейших показателей качества транспортного обслуживания является время поездки, которое складывается из следующих элементов:

- время на передвижение от места отправления до маршрута городского пассажирского транспорта (ГПТ) и от него до места назначения находится в прямой зависимости от плотности маршрутной сети;
- время на передвижение до остановочного пункта зависит от расстояния между ними;
- время ожидания транспортного средства (ТС) принимается равным половине интервала движения;

- время на посадку в ТС и выход из него зависит от конструктивных особенностей ТС и параметров остановочного пункта;
- время на пересадку складывается из времени перехода на остановочный пункт и ожидания ТС;
- время проезда на транспорте.

По различным оценкам доля времени проезда на транспорте во времени поездки составляет от 40 до 80 %. От проекта маршрутной сети зависит время пешеходных передвижений пассажира, а уровень организации движения по линиям ГПТ должны обеспечивать высокую скорость и стабильность сообщения [1].

Повышение скорости сообщения обеспечивается как за счет использования ТС с высокими динамическими характеристиками

в пределах уровня комфорта для пассажиров и устранения помех по трассе движения, так и методами по стабилизации режимов движения, среди которых все большее значение приобретают автоматизированные и автоматические системы [2].

Первая коммерческая система автоматического транспорта разработана фирмой Boeing и эксплуатируется с 1975 года в городе Morgantown в США, где связывает учебные здания местного университета с несколькими комплексами студенческих общежитий. Общая протяженность сети 13,9 км, на которой имеется 7 остановочных пунктов. В системе эксплуатируется 73 полностью автоматических вагонов. Вагоны системы вмещают 20 человек и передвигаются по подогреваемому в зимнее время бетонному полотну с направляющими со скоростью до 30 км/ч. Стоимость системы составила более 60 млн долл. Система бесплатно обслуживает 20 тыс. студентов, а для жителей города разовая поездка стоит 50 центов. Ввиду того, что система проектировалась в начале 70-х годов прошлого века, она не имеет полного централизованного компьютерного управления, что компенсируется работой трех диспетчеров.

Система автоматического транспорта, построенная на современных технологиях, введена в строй в 2009 году в лондонском аэропорту Хитроу, где она связывает пятый, наиболее современный терминал с удаленными автостоянками. Система протяженностью 3,9 км имеет 3

станции и обслуживается 21 вагоном, который может развивать скорость до 40 км/ч. Среднее время ожидания вагона после вызова составляет 12 с, а максимальное для 95 % пользователей не более 1 мин.

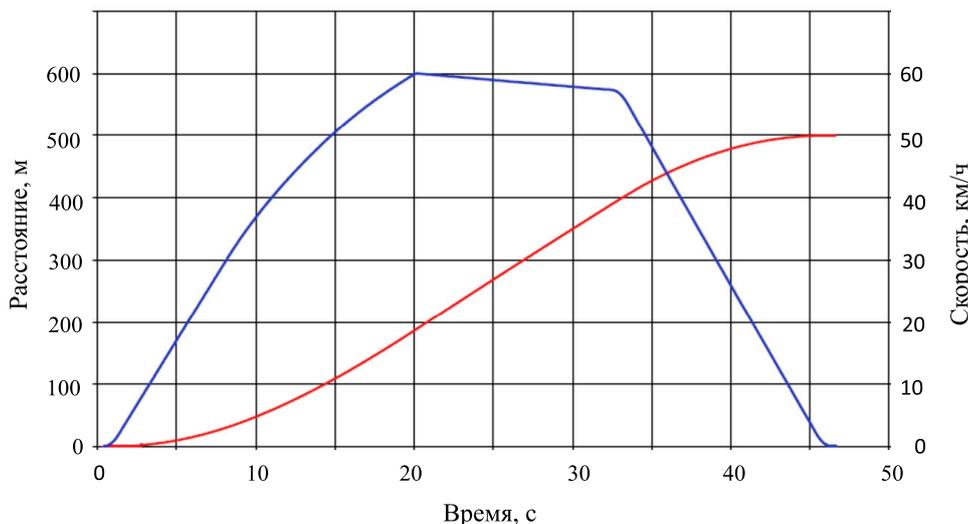
Аналогичные системы в настоящее время связывают выставочные комплексы или парки отдыха с ближайшими станциями массового транспорта в Нидерландах (ParkShuttle), Абу Даби (CyberCab) и Южной Корее (SkyCube). Полностью автоматическое управление реализовано на новых линиях метрополитена и монорельса в Китае, Канаде, Японии и в ряде других стран, в том числе в качестве эксперимента в трамвайных системах [3].

### 1. Автоматизированное управление в системах ГПТ

Функционально системы автоматизированного управления делятся на системы автоведения и системы обеспечения безопасности.

Системы автоведения традиционно распространены на рельсовом транспорте в связи с предопределенностью траектории движения. В настоящее время они используются на ряде зарубежных моделей трамваев, но практика использования трамвайных систем автоведения в РФ отсутствует, в основном уделяется внимание использованию систем обеспечения безопасности [4–6].

На рис. 1 приведены энергооптимизированные зависимости скорости движения и пройденного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м при загрузке поезда 6 пасс./м<sup>2</sup>



**Рис. 1.** Зависимости скорости движения и пройденного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м при загрузке поезда 6 пасс./м<sup>2</sup>

денного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м при загрузке поезда 6 пасс./м<sup>2</sup> для двуправленных трамваев SIRIO итальянского концерна ANSALDOBREDA [7]. При длительности остановки 15 с поезд преодолевает условный перегон за 62 с с эксплуатационной скоростью 29 км/ч при максимальной скорости 60 км/ч.

Такие графики составляются на все перегоны маршрута и закладываются в систему управления трамваем. Функция водителя заключается в управлении дверями состава и включение начала движения трамвая. Система управления воздействует на тягу и тормозные системы в соответствии с заложенными параметрами. Водитель может вмешаться в управление в любой момент при возникновении нештатной ситуации.

Уровни автоматизации управления, согласно стандарту Society of Automotive Engineers (Общество автомобильных инженеров США) SAE J3016 [8], приведены в табл. 1.

Согласно стандарту SAE J3016 система автоматизации управления представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, которые совместно реализуют частично или все функции управления динамикой ТС на устойчивой основе. В отличие от этого определения, которое охватывает все уровни, для уровней 3–5 используется определение системы автоматического управления, которая представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, совместно реализующих все функции управления динамикой ТС на устойчивой основе независимо от наличия ограничений функционала конструктивных решений.

Для рельсового транспорта в городах основные принципы автоматизации управления изложены в стандарте IEC 62290–1 [9]. На его основе разработан ГОСТ Р 70059–2022<sup>1</sup>, в котором введены 4 уровня автоматизации (УА) системы управления, приведенные в табл. 2.

Таким образом, внедрение системы автоматизированного и автоматического управления трамваем должно учитывать, что трамвай, яв-

ляясь рельсовым транспортом и участником городского движения, подпадает под действие различных по направленности нормативных документов.

## 2. Структура затрат на эксплуатацию трамваев

Структура затрат на эксплуатацию трамваев представляет собой комплексную систему расходов, связанных с обеспечением их надлежащего функционирования и обслуживания. Эксплуатация трамваев включает в себя различные аспекты, начиная от осуществления технического обслуживания и ремонта, закупки необходимых запасных частей и материалов, оплаты труда персонала, включая водителей, кондукторов, технический персонал и административный персонал, и заканчивая оплатой электроэнергии, содержанием энергохозяйства и инфраструктуры. Кроме этого, затраты на эксплуатацию включают в себя амортизацию подвижного состава, необходимого для выполнения перевозок.

Структура эксплуатационных затрат включает в себя следующие статьи расходов перевозчика в соответствии с Приказом Минтранса № 351 [10]:

1. Расходы на оплату труда водителей трамвая ( $C_{зпв}$ ) определяются произведением средней стоимости одного часа работы водителя трамвая на планируемое количество часов работы трамваев, необходимых для выполнения перевозок, включая продолжительность подготовительно-заключительных операций, прохождения предрейсовых инструктажей и медицинских осмотров водителя.

2. Расходы на оплату труда кондукторов ( $C_{зпк}$ ), если они имеются. Даже при использовании автоматизированной системы оплаты проезда может потребоваться наличие кондуктора в салоне ТС.

3. Отчисления на социальные нужды от оплаты труда водителей и кондукторов трамвая ( $C_{сн}$ ).

4. Расходы на электроэнергию на движение трамваев ( $C_э$ ) учитывают стоимость электроэнергии и нормативное потребление электроэнергии, которое в свою очередь зависит от класса используемых трамвайных вагонов. Кроме этого, в затратах перевозчика учитыва-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 70059–2022 Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозки пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования. ФГБУ «РСТ», 2022. 12 с.

Таблица 1. Уровни автоматизации управления

Уровень SAE	Наименование	Описание	Рулевое управление, разгон или торможение	Наблюдение за обстановкой	Резервное управление динамикой	Режимы управления
Водитель самостоятельно следит за дорожной обстановкой						
0	Без автоматизации	Весь процесс вождения контролирует водитель, задача управления динамикой автомобиля лежит полностью на нем	B	B	B	Нет
1	Включающий помощь водителю	Помощь водителю в управлении рулевой системой или тормозами и педалью подачи топлива, используя информацию о внешней среде	B+C	B	B	Некоторые
2	Частично автоматизированный	Система способна, совместно функционируя, воздействовать и на рулевое управление, и на ускорение или торможение	C	C	B	Некоторые
Автоматизированная система управления наблюдает за дорожной обстановкой						
3	Условно	Система автоматизации вождения берет на себя контроль за динамикой ТС, но водитель может вмешаться	C	C	B	Некоторые
4	Высоко	Система автоматизации вождения берет на себя управление ТС, даже в том случае, если водитель не отреагировал на требование вмешаться в процесс управления. Решения принимает сама система управления динамикой ТС	C	C	C	Некоторые
5	Полностью	Система автоматизации вождения полностью берет на себя те же функции, что и водитель, при этом она может работать в любых условиях внешней среды	C	C	C	Все

Таблица 2. Уровни автоматизации системы по ГОСТ Р 70059-2022

Составная часть системы	Функция	Уровни автоматизации				
		Отсутствие УА0	Частичная УА1	Условная УА2	Высокая УА3	Полная УА4
		Ручной режим	Автоматизированный режим	Автоматический режим		
Бортовое и напольное оборудование	Интервальное регулирование движения поездов	–	+	+	+	+
	Обеспечение безопасной скорости движения поезда	–	+	+	+	+
	Маневровые работы	–	–	–	–	+
	Обнаружение нештатных ситуаций, обработка запросов от пассажиров	–	–	–	–	+
	Предотвращение столкновения	–	–	–	+	+
	Дистанционное управление тягой (моторвагоном)	–	–	–	–	+
	Управление дверьми	–	–	–	–	+
Бортовое оборудование	Контроль отсутствия людей между вагонами или между платформой и поездом	–	–	–	–	+
	Контроль состояния бортового оборудования	–	+	+	+	+
	Управление тягой и торможением	–	–	+	+	+

ется дополнительное производственное энергопотребление (потери в тяговых подстанциях, в системе энергоснабжения, расходы электроэнергии на вспомогательные производственные нужды).

5. Расходы на техническое обслуживание и ремонт трамваев ( $C_{\text{тор}}$ ) включают в себя сумму расходов на оплату труда ремонтных рабочих с отчислениями на социальные нужды и расходов на запасные части и материалы, используемые при техническом обслуживании и ремонте трамваев.

6. Расходы перевозчика на содержание контактно-кабельной сети ( $C_{\text{кк}}$ ) зависят от протяженности контактно-кабельной сети в однопутном исчислении.

7. Расходы перевозчика на содержание тяговых подстанций ( $C_{\text{тп}}$ ) зависят от установленной мощности тяговых подстанций и удельных расходов на их содержание.

8. Расходы перевозчика на содержание и ремонт трамвайного пути ( $C_{\text{п}}$ ) зависят от протяженности трамвайного пути в однопутном исчислении, с учетом всех путей (вспомогательные, служебные и пр.).

9. Расходы перевозчика на содержание собственной службы движения ( $C_{\text{сд}}$ ) зависят от количества используемых трамваев и удельных расходов на содержание службы движения.

10. Прочие расходы ( $C_{\text{пр}}$ ), которые несет перевозчик, включают сумму расходов на оплату труда прочего персонала предприятия с отчислениями и прочих расходов на эксплуатируемые трамваи.

11. Расходы на амортизацию всех ТС ( $A_{\text{пс}}$ ), используемых на перевозках.

Эксплуатационные затраты, которые несет перевозчик, могут быть посчитаны за период или на единицу транспортной продукции, например, 1 км. Таким образом, суммарные затраты на эксплуатацию трамваев с уровнем автоматизации управления в соответствии с SAE J3016–0, 1, 2 и 3, необходимых для выполнения перевозок за рассматриваемый период времени, могут быть рассчитаны следующим образом:

$$C_{\text{экспл}} = C_{\text{зпв}} + C_{\text{зпк}} + C_{\text{сн}} + C_{\text{э}} + C_{\text{тор}} + C_{\text{кк}} + C_{\text{тп}} + C_{\text{п}} + C_{\text{сд}} + C_{\text{пр}} + A_{\text{пс}}$$

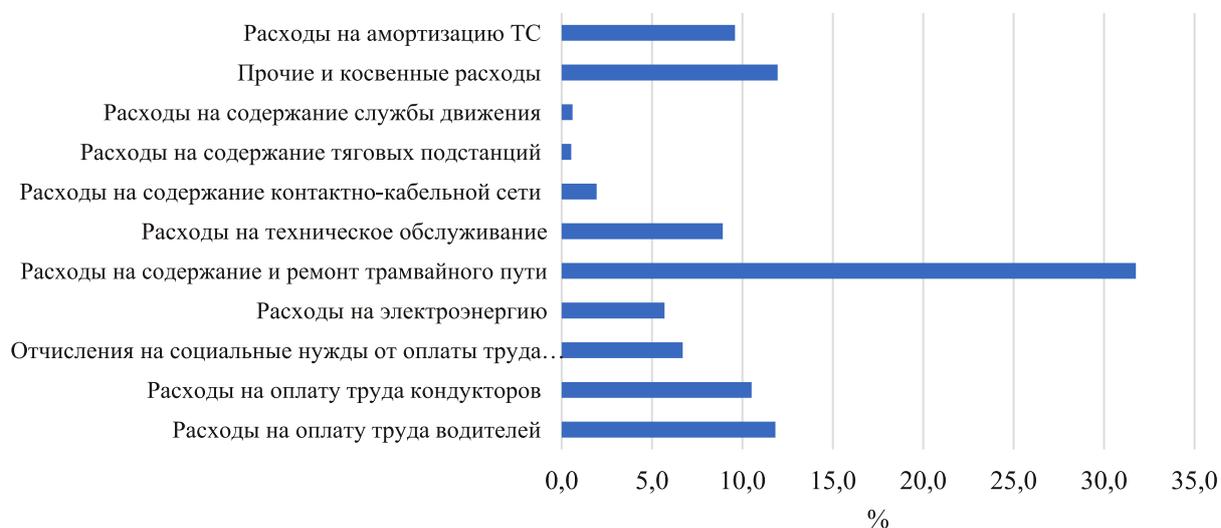
В случае эксплуатации трамваев с уровнем автоматизации управления в соответствии с SAE J3016–4 и 5 или UA3 и UA4 по ГОСТ Р 70059–2022, перевозчик может сократить часть эксплуатационных расходов за счет отсутствия водителя в ТС и, следовательно, отсутствия в статьях затрат оплаты его труда. Кроме этого, использование подобных трамваев предполагает наличие в них инфраструктуры для автоматизированного сбора провозной платы, а значит, и присутствия кондуктора в салоне ТС можно избежать, а значит, сократить еще одну статью эксплуатационных затрат. Однако исследования зарубежных авторов [11, 12] показывают, что даже полная автоматизация транспортных средств не дает возможности полностью сократить статью расходов на оплату труда водителей, поскольку нужен вспомогательный персонал, который будет обслуживать систему управления автоматизированным транспортом, а также может потребоваться дополнительный персонал, который будет следить за соблюдением порядка в ТС. Например, по оценкам, сделанным в Великобритании, при полной автоматизации ТС все равно закладывается порядка 40 % затрат на оплату труда дополнительного персонала.

В настоящей статье, в разделе 3, приведены результаты исследований возможной эффективности применения автоматизированных ТС, произведенных на примере одного из трамвайных маршрутов г. Санкт-Петербурга —

№ 19. Поскольку одним из параметров эффективности применения трамваев без управления водителем, о котором упоминалось выше, является сокращение статьи расходов на оплату труда водителей, представляется целесообразным оценить размер этой статьи расходов перевозчика в общей структуре эксплуатационных затрат.

В исследованиях зарубежных авторов отмечается, что статья расходов на заработную плату водителей пассажирского транспорта является самой крупной статьей расходов и составляет по разным оценкам от 40 до 70 % от общих затрат на перевозки: в Швеции — порядка 42 % [13], в Сингапуре [14] и в Австралии [15], в зависимости от типа используемых ТС — от 40 до 70 % соответственно, в Японии [16] расходы на заработную плату водителей составляют порядка 53 %.

В России заработная плата водителей значительно ниже западных коллег, однако совокупная статья расходов на заработную плату водителей и кондукторов с отчислениями составляет порядка 30 % от общих эксплуатационных расходов, что является определенным резервом для снижения затрат перевозчика при внедрении в эксплуатацию автоматизированных транспортных средств. Структура эксплуатационных расходов на примере трамвайного маршрута № 19 приведена на рис. 2. В расчете использовались существующие параметры для рассматриваемого трамвайного маршрута.



**Рис. 2.** Структура эксплуатационных затрат на примере трамвайного маршрута № 19 «Лахтинский Разлив» — «ж. д. станция Старая Деревня»

Основной составляющей структуры затрат на эксплуатацию трамваев на рассматриваемом маршруте являются расходы на содержание и ремонт трамвайного пути, чуть более 30%. Однако, как было сказано ранее, оплата труда персонала — вторая важная составляющая структуры затрат на эксплуатацию трамваев. Количество персонала, занятого в эксплуатационном процессе, может быть значительным. Кроме водителей и кондукторов, включенных в штат, также может требоваться персонал технических служб, административный персонал для управления и контроля за процессом эксплуатации, другие специалисты. Затраты на оплату труда водителей и кондукторов, включая все стандартные выплаты, связанные с официальным трудоустройством, а также премии и вознаграждения в совокупности составляют порядка 30%.

Таким образом, сократив значительную составляющую эксплуатационных затрат на оплату труда водителей и кондукторов пусть даже не полностью, а частично, за счет внедрения ТС с автоматизированным управлением, это позволит получить экономическую выгоду перевозчику, что будет показано в разделе 3 данной статьи.

Далее в статье будут рассмотрены и другие составляющие эффекта от внедрения автоматизированного управления в ТС.

Однако необходимо учитывать, что внедрение ТС с автоматизированным управлением, наряду с рядом экономических эффектов для перевозчика, потребует закупки дополнительного оборудования и программного обеспечения необходимого для полной автоматизации, например, высокоточные системы автоматического определения местоположения, видеокамеры, ультразвуковые датчики, карты высокого разрешения, центральные процессоры, устройства для связи с другими ТС (vehicle-to-vehicle V2V) и с инфраструктурой (vehicle-to-infrastructure V2I), датчики одометрии, экраны для взаимодействия человека и компьютера (human-machine interaction HMI) с пассажирами (внутренние экраны) и пешеходами (внешние экраны) [17].

В литературе имеется очень мало оценок, на сколько может увеличиться стоимость ТС, используемых для перевозки пассажиров,

с установкой на него оборудования для полной автоматизации. Например, [18] считает, что дополнительные затраты на автоматизацию автобуса для пассажирских перевозок, не являются значительными по сравнению с ценой покупки ТС, а значит, для ТС предполагается нулевое увеличение затрат. В работе [14] отмечается, что для 6-метрового электрического автобуса рост затрат на его автоматизацию составит 36% (на 2019 год), но ожидается, что к 2030 году это значение снизится до 7%. По оценкам российских производителей трамваев стоимость автоматизированного управления и систем помощи водителю, которыми в настоящее время оснащаются трамвайные вагоны, увеличит его закупочную стоимость ориентировочно на 7%.

Таким образом, при оценке эффективности автоматизированного управления, в разделе 3, будет учтено не только снижение эксплуатационных затрат, но и рост статьи затрат на приобретение и амортизацию ТС.

### **3. Оценка эффективности автоматизированного управления**

Поскольку в России опыт использования автоматизированных ТС еще пока невелик, стоит обратиться к зарубежному опыту. В 2019–2020 годы в ряде стран (Швеция, Франция, Сингапур) начались испытания автобусов с автоматизированным управлением [17]. В настоящее время до конца неизвестно, в каких городских условиях ТС с автоматизированным управлением могут свободно использоваться и на каких скоростях, учитывая соображения безопасности. Таким образом, параллельно с испытаниями среди экспертов велись дискуссии о возможности использования полностью автоматизированных ТС в условиях городов. Сейчас все зарубежные эксперты сходятся во мнении, что полностью автоматизированные ТС смогут работать только в определенных условиях, таких как изолированные дороги и низкоскоростная среда [19].

Зарубежные специалисты едины во мнении, что, помимо экономии эксплуатационных расходов, использование ТС с автоматизированным управлением сможет повлиять на эффективность функционирования системы ГПТ и другими способами. Например, в ав-

тобусы, трамваи или троллейбусы может быть внедрен ряд технологий автоматизации управления (системы помощи водителю), таких как предотвращение столкновений, удержание полосы движения, движение ТС в колонне, точное примыкание ТС ГПТ к остановочной платформе (наличие узкого и стабильного зазора между ТС и платформой на остановочных пунктах), адаптивный круиз-контроль, экстренное торможение и др. Ожидаемые преимущества подобных инноваций описаны в работе [20] и включают в себя: снижение количества столкновений, травм и расходов на связанную с этим ответственность; повышение качества услуг для маломобильных групп населения; увеличение пропускной способности транспорта, особенно на выделенных приоритетных полосах и коридорах для движения ГПТ.

В работе [16] оценивается общая экономия затрат за счет использования ТС с автоматизированным управлением в Японии, включая затраты перевозчика и время в пути для пассажиров. Автор предполагает, что время ожидания задается экзогенно, то есть зависит от внешних факторов и не зависит от того, используется ТС с автоматизированным управлением или под управлением человека, поэтому влияние автоматизации на оптимизацию параметров транспортного обслуживания (например, частоту движения ГПТ) не рассматривается.

В работе [17] проведено исследование, на примере Чили и Германии (развивающейся и развитой страны), в котором аналитически оценивается влияние автоматизированного управления на различные факторы, такие как вместимость ТС, частоту движения ТС, стоимость проезда и др. Авторы рассматривают и сравнивают эффекты от различных сценариев использования ТС с автоматизированным управлением, таких как, полная или частичная экономия на оплате труда водителей, увеличение или, напротив, снижение скорости движения ТС с автоматизированным управлением. В результате исследования авторами сделан вывод, что использование ТС с автоматизированным управлением выгодно как перевозчикам, за счет снижения эксплуатационных затрат, так и пользователям ГПТ, за счет снижения затрат времени и оптимального тарифа на перевозку.

Еще одним эффектом для перевозчика от использования ТС с автоматизированным управлением является экономия топлива за счет более сбалансированного стиля вождения. В работе [18] отмечается, что экономия топлива, при использовании автобусов с автоматизированным управлением, составляет 10 % по сравнению с затратами на топливо при использовании автобусов, управляемых человеком.

Таким образом, оценка влияния от внедрения ТС с автоматизированным управлением на эксплуатационные затраты перевозчика, время в пути пассажира, безопасность движения и энергопотребление представляет собой область исследований, которой в настоящее время уделяется большое внимание.

На основе анализа зарубежного опыта по определению эффективности внедрения ТС с автоматизированным управлением, представляется интересным провести подобное исследование для условий функционирования ГПТ в Санкт-Петербурге.

В данной статье мы сосредоточимся на механизмах влияния внедрения автоматизированных ТС на затраты перевозчика, а именно:

- экономия эксплуатационных расходов за счет сокращения затрат времени ТС в пути (на рейс или оборот) и, как следствие, сокращение потребного количества ТС, для выполнения того же количества рейсов;
- экономия эксплуатационных расходов, в связи с отсутствием необходимости использования водителя, даже при том, что стоимость приобретения ТС, оборудованных средствами автоматизации, значительно повышается.

В рамках проведенного нами исследования по определению эффективности использования ТС с автоматизированным управлением в качестве исходных данных был выбран трамвайный маршрут № 19. Маршрут проходит от конечной станции «Лахтинский Разлив» до конечной станции «ж. д. станция Старая Деревня». Протяженность маршрута в прямом и обратном направлениях 4,55 км. Перечень остановочных пунктов с расстояниями между ними в прямом и обратном направлениях приведен в табл. 3. В настоящее время на маршруте работает 5 трамваев большого класса вместимости.

**Таблица 3. Перечень остановочных пунктов и протяженности между ними на трамвайном маршруте № 19 «Лахтинский Разлив» – «ж. д. станция Старая Деревня»**

Расстояния в прямом направлении маршрута, м	Наименование остановок	Расстояния в обратном направлении маршрута, м
	Лахтинский Разлив	500
500	Школьная ул.	700
700	станция метро «Беговая»	700
700	Яхтенная ул.	550
550	ТК «Лента»	600
600	ул. Савушкина, 111	250
250	Стародеревенская ул.	250
	нет / Горохов пер.	550
800	Администрация Приморского района	450
450	ж. д. станция Старая Деревня	
<b>4550</b>		<b>4550</b>

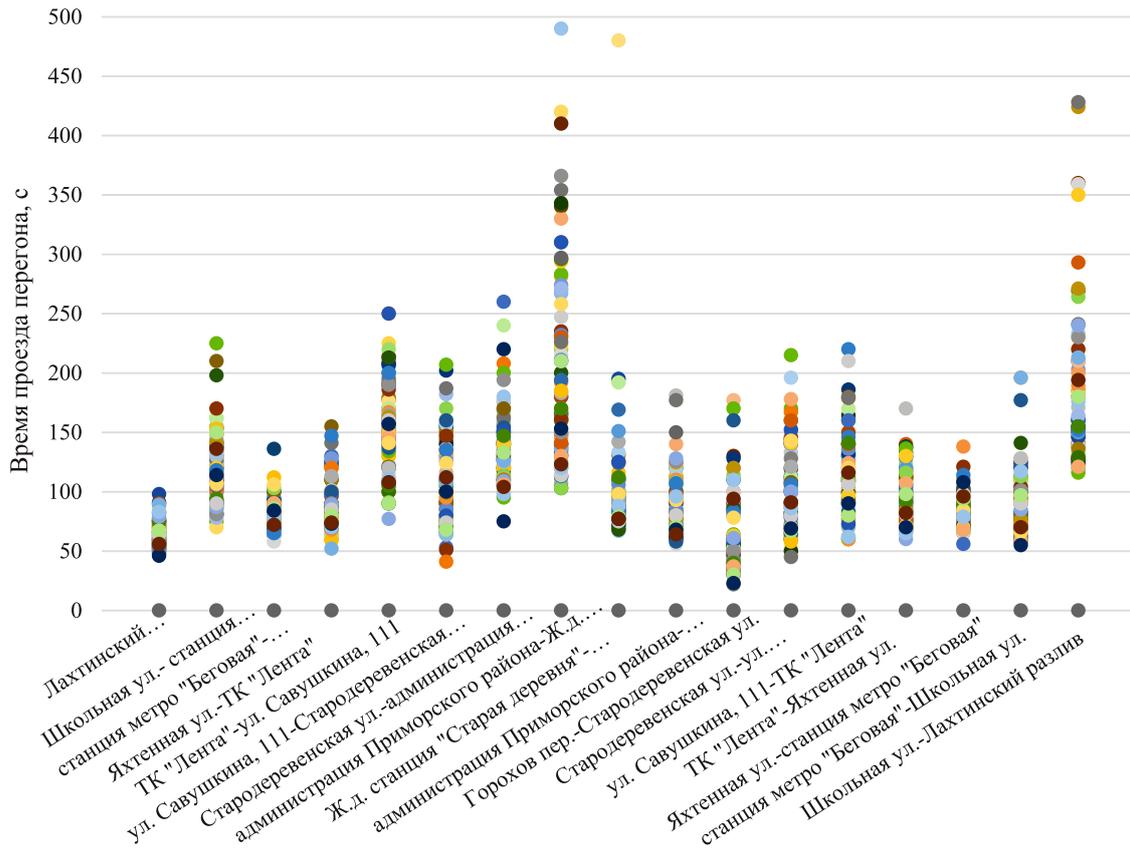
Мы анализируем условия движения трамваев, на примере трамвайного маршрута № 19, под управлением водителя, его эксплуатационную скорость, время проезда между остановочными пунктами и сравниваем аналогичные параметры с вариантом, когда трамвайный маршрут будет обслуживаться трамваями с частично или полностью автоматизированным управлением. При этом при расчете эксплуатационных затрат на рассматриваемый трамвайный маршрут мы учитываем случаи, когда не все затраты на оплату труда водителей, благодаря автоматизации, сокращаются, а скорость движения ТС с автоматизированным управлением может быть даже ниже, чем у ТС, управляемых водителем, а также в расчетах учитываем увеличение стоимости трамваев за счет оборудования из средствами автоматизации и помощи водителю.

Для анализа условий движения трамваев, на рассматриваемом маршруте № 19, мы воспользовались данными бортового оборудования системы GPS/ГЛОНАСС, которым оснащено каждое ТС ГПТ в Санкт-Петербурге, при помощи которого осуществляется передача данных в автоматизированную систему управления городским пассажирским транспортом. С помощью подобной системы, на основе данных, предоставленных СПб ГКУ «Организатор перевозок», обрабатывался массив данных о фак-

тическом времени прохождения каждым (из 5 работающих по будним дням) трамваем расстояния между всеми остановочными пунктами в каждом рейсе в течение времени работы маршрута. Это исследование проводилось с целью определить разброс значений времени проезда трамвая, управляемого водителем, по одинаковым участкам маршрута в течение времени работы маршрута. Пример результатов проведенного исследования представлен на рис. 3.

Данные на рис. 3 показывают, что разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона на маршруте достаточно велик (каждая вертикальная линия из точек над наименованием перегона), и разница между минимальным и максимальным временем проезда по перегону различается в среднем более чем в 4 раза. Это может быть связано со многими факторами, которые условно можно разделить на две категории:

- человеческие (водитель может в разное время по-разному управлять трамваем, в зависимости от настроения, усталости, дорожной обстановки и пр.). Тогда, устранив этот фактор, за счет использования трамваев с автоматизированным управлением, можно значительно сократить время проезда по маршруту.
- внешние (светофорное регулирование по пути следования трамвая по маршруту,



**Рис. 3.** Разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона по маршруту № 19 в прямом и обратном направлениях во время работы маршрута (с 5:49 до 0:47)

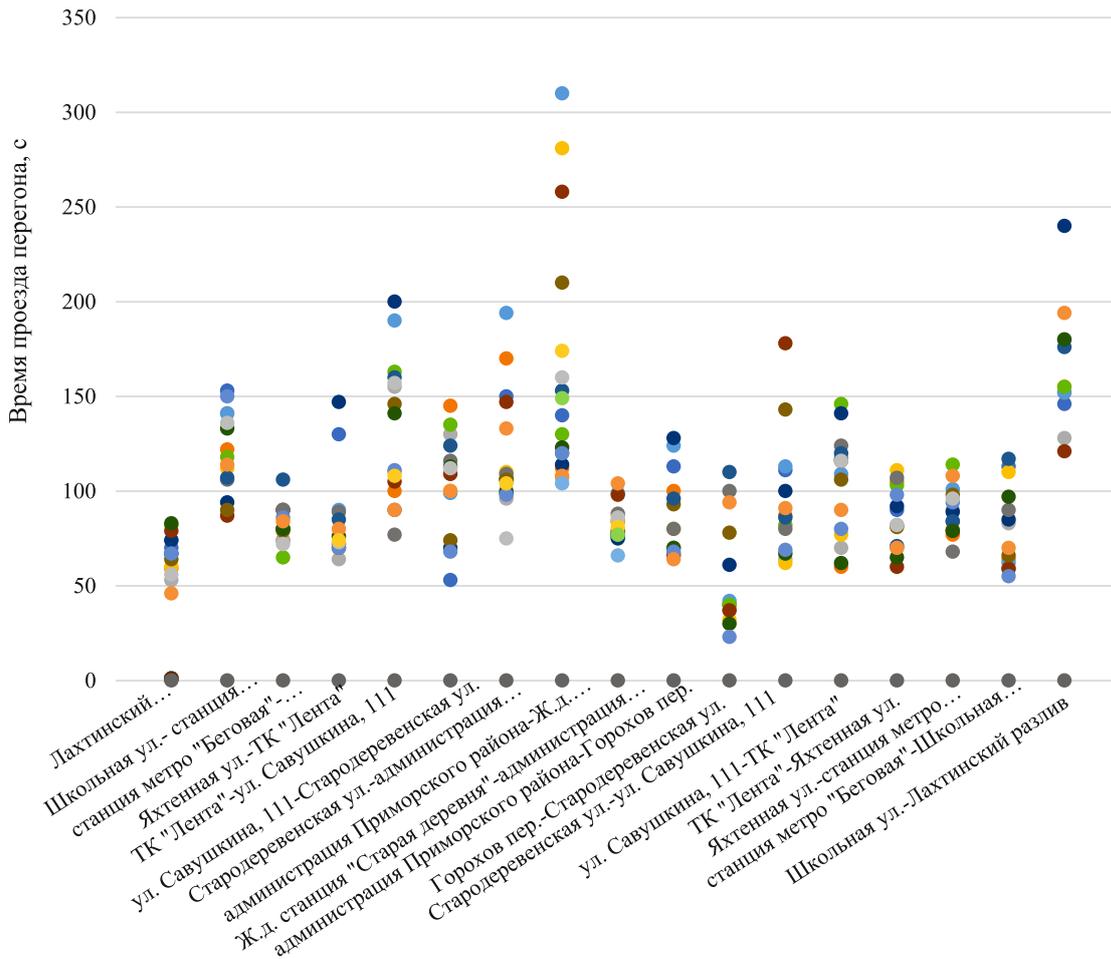
затрудненное движение трамвая в связи с заторами на дорогах, где трамвай следует в общем потоке с другими транспортными средствами). Нивелировать внешние факторы можно за счет физического обособления трамвайных путей на всем протяжении маршрута, а также обеспечения приоритета трамваю средствами светофорного регулирования.

Для понимания значимости (веса) второй категории факторов (внешних), влияющих на разброс времени проезда перегона, мы с некоторой степенью условности предположили, что если исследовать разброс времени проезда в раннее утреннее время (до 7:00) и позднее вечернее время (после 22:00), когда загруженность дорог не слишком велика, можно получить значения, на которые влияют в большей степени факторы из первой категории (человеческие). На рис. 4 приведены результаты исследования разброса времени проезда перегонов

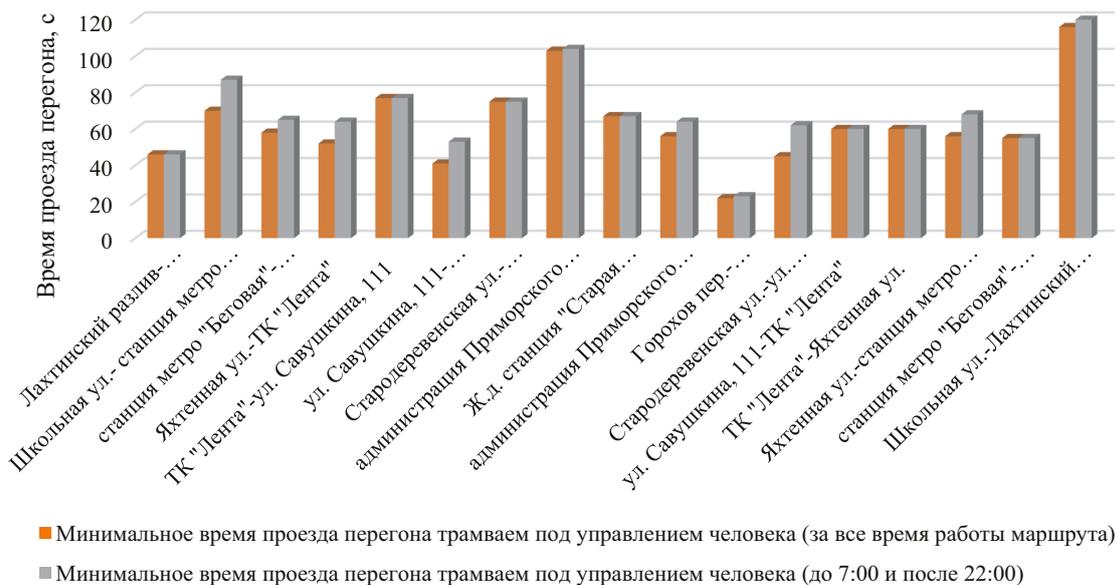
трамваем, под управлением человека, в утреннее (до 7:00) и вечернее (после 22:00) время.

Данные на рис. 4 показывают, что разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона на маршруте в утреннее и вечернее время (каждая вертикальная линия из точек над наименованием перегона) меньше, чем в случае исследования этого же времени в течение всего дня, и разница между минимальным и максимальным временем проезда по перегону различается в среднем в 2,6 раза. При этом необходимо отметить, что минимальные времена проезда перегонов в утреннее и вечернее время на большинстве из них больше, чем минимальное время проезда перегонов, исследуемое за целый рабочий день (рис. 5).

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что внешние факторы, безусловно, влияют на разброс времени прохождения перегона, но преимущественное влияние оказывает именно человеческий фактор.



**Рис. 4.** Разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона по маршруту № 19 в прямом и обратном направлениях во время работы маршрута (с 5:49 до 7:00 и с 22:00 до 0:47)



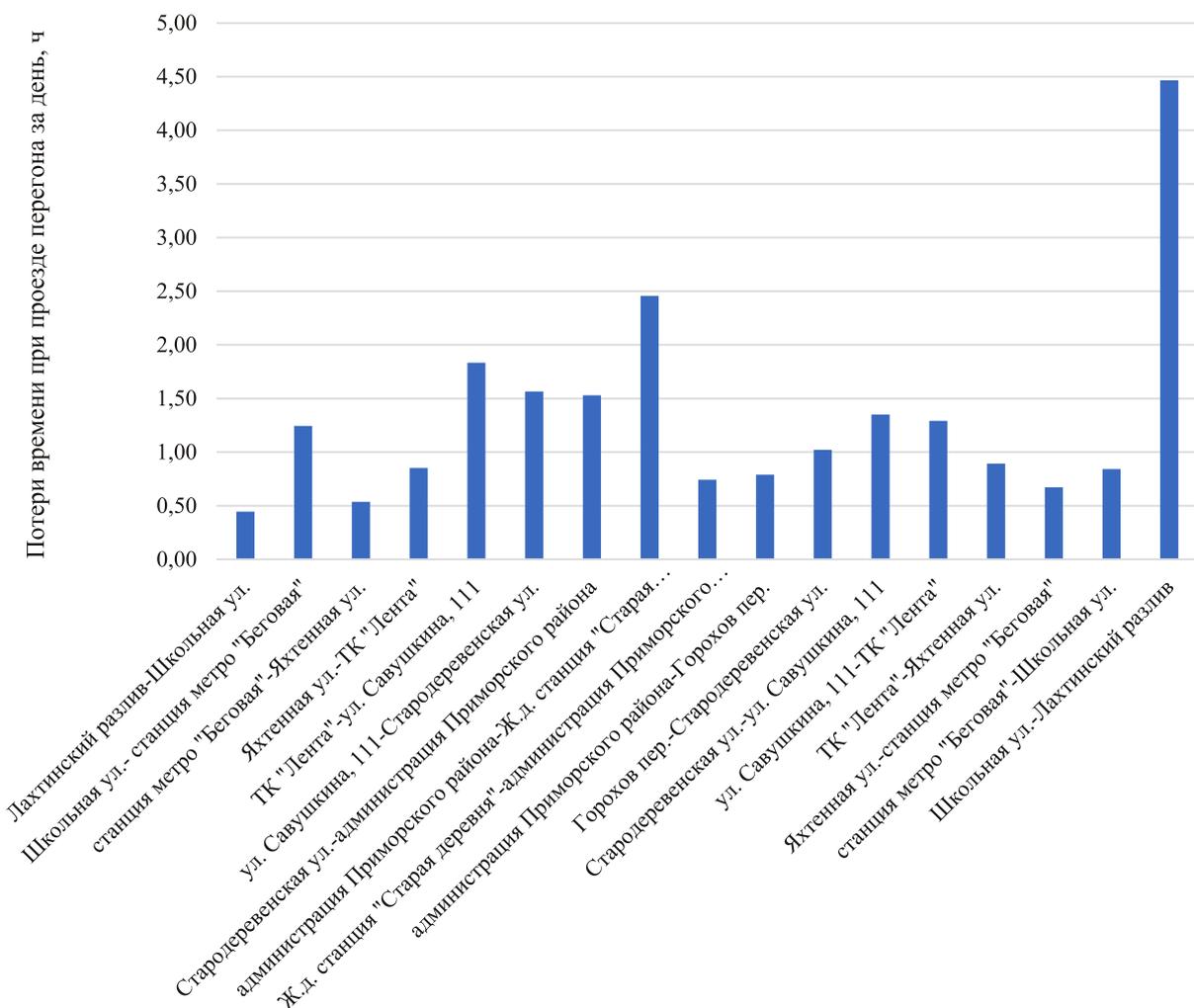
**Рис. 5.** Сравнение минимальных времен проезда перегонов по маршруту № 19 трамваем, под управлением водителя, в различное время работы маршрута

Можно предположить, что, исключив человеческий фактор, за счет использования трамвая с автоматизированным управлением вместо управления водителем, время проезда перегона трамваем с автоматизированным управлением может быть равно минимальному времени проезда перегона трамваем под управлением водителя.

Таким образом, на основе проведенного исследования разброса времени проезда трамваем перегонов на маршруте № 19 (рис. 3 и 4), исключив по возможности факторы, влияющие на разброс значений времени, реально посчитать эффект, который можно достичь, исключив потери времени от неравномерного движения трамваев, рассчитав сумму отклонений времени проезда перегона от минимального значения проезда в каждом рейсе (рис. 6).

Анализируя данные, приведенные на рис. 6, мы пришли к выводу, что если минимизировать разброс значений времени проезда каждого перегона трамваем, то можно получить эффект в размере порядка 22,5 ч ежедневно (суммарное значение потерь времени проезда по маршруту в прямом и обратном направлении в течение рабочего дня).

Возможно предположить, что подобный эффект может быть получен при использовании на маршруте трамваев с автоматизированной системой управления. Однако мы не можем быть уверены, что трамвай с автоматизированной системой управления будет проезжать перегон за то же время (нижняя граница разброса значений (см. рис. 3)), что и трамвай, управляемый водителем. Так, например, по оценкам зарубежных авторов, остается неяс-



**Рис. 6.** Ежедневные потери времени по перегонам маршрута № 19 от неравномерного движения трамваев, управляемых водителем

ным, сможет ли автоматизированное ТС двигаться быстрее в городах, в условиях движения в общем потоке с другими ТС, пешеходами и велосипедистами. Максимальная скорость автоматизированных ТС может быть намеренно ограничена, чтобы избежать риска для безопасности движения. В настоящее время, по опыту использования автоматизированных ТС в Швейцарии, Финляндии и Швеции, максимальная скорость движения для них установлена в диапазоне от 14 до 20 км/ч. В Стокгольме максимальная скорость движения автоматизированного ТС составляла 12 км/ч в первые четыре месяца, а затем была увеличена до 15 км/ч [21]. Такая тенденция — начинать с достаточно низкой скорости и постепенно увеличивать ее, вполне ожидаема, из соображений безопасности и изучения условий эксплуатации, в которых будут использоваться автоматизированные ТС. Однако в настоящее время неизвестно, в каких городских условиях автоматизированные ТС смогут работать на скорости, сопоставимой с ТС, управляемыми водителем. Таким образом, далее может быть рассмотрено два варианта развития событий:

1. Одинаковая средняя скорость движения автоматизированных ТС и управляемых водителем ТС. Тогда минимальное время проезда каждого перегона трамвая, следующим по маршруту № 19 под управлением водителя, может быть приравнено к времени проезда каждого перегона трамвая с автоматизированной системой управления. Этот вариант может быть реализован в случае, если сокращение времени в пути за счет технологий автоматизации, связи между транспортными средствами (V2V) и между инфраструктурой (V2I) полностью компенсируется снижением скорости движения, установленной для автоматизированных транспортных средств по соображениям безопасности движения.

2. Различная скорость (более высокая или, возможно, более низкая) автоматизированных ТС по сравнению с ТС, управляемыми водителем в городских условиях. Этот вариант используется практически во всех пилотных программах по внедрению автоматизированных ТС (преимущественно автобусов, которые работают совместно с другими, не автоматизированными ТС) в условиях, где по сообра-

жениям безопасности для автоматизированных ТС устанавливаются низкие ограничения скорости [26], чтобы компенсировать любое потенциальное сокращение времени в пути, обеспечиваемое технологиями автоматизации и коммуникаций V2V и V2I.

В этой связи представляется интересным сравнить прогнозные значения времени проезда перегонов трамвая с автоматизированной системой управления, рассчитанные на основе графика зависимости скорости движения и пройденного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м (см. рис. 1), с минимальным временем проезда этих же перегонов трамвая, под управлением человека (табл. 4).

Сравнивая итоговые значения, приведенные в табл. 4, можно сделать вывод, что минимальное время проезда по маршруту № 19 трамвая, под управлением водителя, без учета посадки и высадки пассажиров, а также без учета отстоя на конечных станциях, составляет 17,7 мин. При этом время проезда по маршруту трамвая, с автоматизированной системой управления, также без учета времени на посадку и высадку пассажиров и отстоя на конечных станциях, составляет 13,9 мин, что в 1,3 раза меньше. Таким образом, среднетехническая скорость трамвая, работающего на маршруте № 19, под управлением человека и с автоматизированной системой управления составляет 30,9 км/ч и 39,3 км/ч соответственно.

В свою очередь, уменьшение времени рейса, за счет внедрения ТС с автоматизированной системой управления, приведет к снижению количества ТС, необходимых для выполнения заданного объема транспортной работы, ТС (табл. 5).

Определение потребного количества трамваев ( $A_{тр}$ ) для выполнения заданного объема транспортной работы определялось по формуле:

$$A_{тр} = (N_p t_{об}) / 2 T_m,$$

где  $N_p$  — необходимое количество рейсов, ед.;  
 $t_{об}$  — время оборотного рейса, ч;  
 $T_m$  — время работы ТС на маршруте, ч.

Таким образом, произведенные расчеты показали, что для выполнения 172 рейсов в сутки

**Таблица 4. Времена проезда перегонов трамвайного маршрута № 19**

Наименование перегона	Протяженность перегона, км	Минимальное время проезда перегона трамваем под управлением водителя, с	Время проезда перегона трамваем с автоматизированной системой управления, с	Время проезда перегона трамваем с автоматизированной системой управления (с учетом времени на посадку и высадку пассажиров), с
Лахтинский Разлив – Школьная ул.	0,5	46	47	72
Школьная ул. – станция метро «Беговая»	0,7	70	59	84
станция метро «Беговая» – Яхтенная ул.	0,7	58	59	84
Яхтенная ул. – ТК «Лента»	0,55	52	50	75
ТК «Лента» – ул. Савушкина, 111	0,6	77	53	78
ул. Савушкина, 111 – Стародеревенская ул.	0,25	41	34	59
Стародеревенская ул. – Администрация Приморского района	0,8	75	65	90
Администрация Приморского района – ж. д. станция Старая Деревня	0,45	103	42	67
ж. д. станция Старая деревня – Администрация Приморского района	0,45	67	42	67
Администрация Приморского района – Горохов пер.	0,55	56	50	75
Горохов пер. – Стародеревенская ул.	0,25	22	34	59
Стародеревенская ул. – ул. Савушкина, 111	0,25	45	34	59
ул. Савушкина, 111 – ТК «Лента»	0,6	60	53	78
ТК «Лента» – Яхтенная ул.	0,55	60	50	75
Яхтенная ул. – станция метро «Беговая»	0,7	56	59	84
станция метро «Беговая» – Школьная ул.	0,7	55	59	84
Школьная ул. – Лахтинский Разлив	0,5	116	47	97
Итого в прямом направлении	4,55	522 (8,7 мин)	409 (6,8 мин)	609 (10,2 мин)
Итого в обратном направлении	4,55	537 (9,0 мин)	428 (7,1 мин)	678 (11,3 мин)
Итого за оборот	9,1	1059 (17,7 мин)	837 (13,9 мин)	1287 (21,5 мин)

**Таблица 5. Расчетные значения требуемого количества трамваев для сравниваемых вариантов**

Параметр	Трамвай под управлением человека (существующие значения параметров)	Трамвай с автоматизированной системой управления (прогнозные значения параметров)
Среднее время работы трамвая на маршруте, ч	16	16
Среднее время оборотного рейса, ч	0,83	0,37
Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	11,0	24,6
Количество рейсов в день, ед.	172	172
Требуемое количество трамваев, ед.	5	2

**Таблица 6. Эффект от внедрения автоматизированного управления по рассматриваемым сценариям**

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Годовые эксплуатационные затраты, млн руб.	137,2	96,1	87,5	116,5
Себестоимость 1 км пробега, руб./км	394,3	285,5	258,7	327,3

по маршруту № 19 достаточно двух трамваев с автоматизированной системой управления, что в 2,5 раза меньше, чем при использовании трамваев под управлением водителя.

Для количественной оценки снижения эксплуатационных затрат перевозчика от внедрения ТС с автоматизированной системой управления были произведены расчеты по методике, приведенной в разделе 2 данной статьи по следующим сценариям (табл. 6):

**Сценарий 1.** Эксплуатационные затраты перевозчика при существующем варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (трамваи работают под управлением человека). При работе на маршруте 5 трамваев большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет 45 млн руб. Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км.

**Сценарий 2.** Эксплуатационные затраты перевозчика при прогнозном варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (работают трамваи с уровнем автоматизации управления согласно SAE — 3 или 4, когда водитель может вмешиваться в процесс или наблюдать за процессом движения). То есть при таком варианте затраты перевозчика снижаются за счет сокращения требуемого количества трамваев, при этом затраты на оплату

труда водителей остаются. На маршруте работает 2 трамвая большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет на 7 % больше, за счет оборудования для автоматизации, чем для трамвая без автоматизации (48,15 млн руб.). Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км.

**Сценарий 3.** Эксплуатационные затраты перевозчика при прогнозном варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (работают трамваи с уровнем автоматизации управления согласно SAE — 5, когда водитель не требуется). То есть при таком варианте затраты перевозчика снижаются за счет сокращения требуемого количества трамваев и за счет сокращения затрат на оплату труда водителей и кондукторов. Однако, следуя зарубежному опыту, в том числе описанному выше в данной статье, оставляем половину затрат на вспомогательный персонал, который может потребоваться для обслуживания автоматизированной системы управления и слежения за порядком в ТС. При этом на маршруте, как и в Сценарии 2, работает 2 трамвая большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет на 7 % больше, за счет оборудования для автоматизации, чем для трамвая без автоматизации (48,15 млн руб.).

Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км.

Сценарий 4. Эксплуатационные затраты перевозчика при прогнозном варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (работают трамваи с уровнем автоматизации управления согласно SAE — 5, когда водитель не требуется), при этом количество трамваев для работы на маршруте оставляем 5 трамваев большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет 48,15 млн руб. Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км. При таком варианте затраты перевозчика снижаются только за счет сокращения затрат на оплату труда водителей и кондукторов, но с учетом оплаты труда вспомогательного персонала, который может потребоваться для обслуживания автоматизированной системы управления и слежения за порядком в ТС.

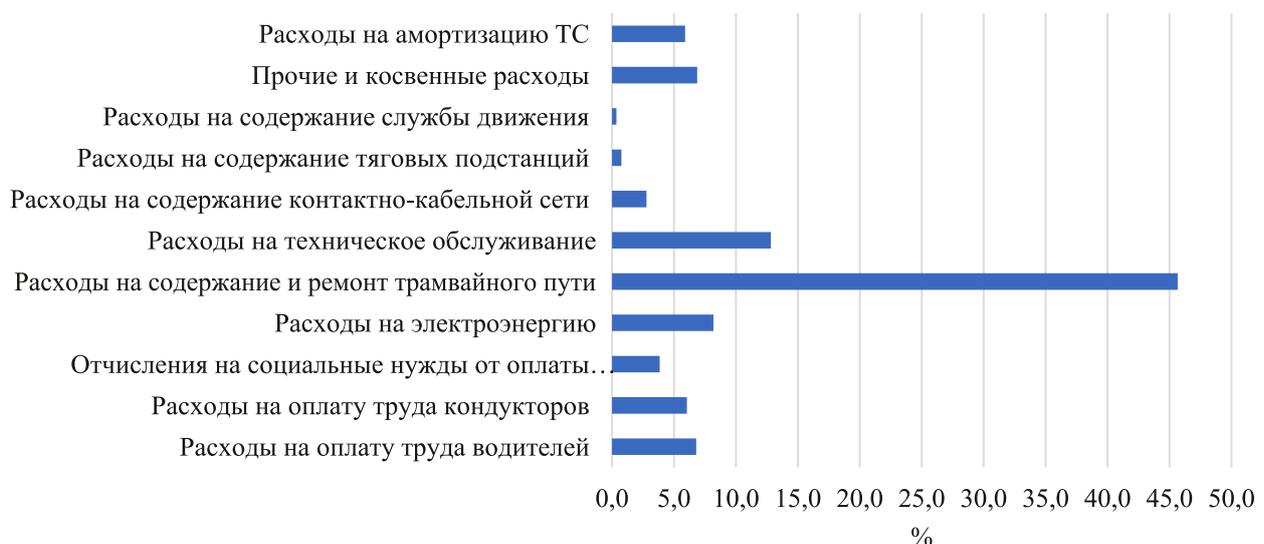
Из расчетов можно сделать вывод, что внедрение средств автоматизации уровня 3 или 4 согласно SAE, когда транспортное средство управляется системой автоматизации, но при необходимости водитель может вмешиваться в процесс управления, позволит снизить годовые эксплуатационные затраты перевозчика и себестоимость 1 км пробега на трамвайном маршруте № 19 на 30% и 27,6% соответственно. В свою очередь, внедрение средств автоматизации уровня 5 согласно SAE, когда

транспортное средство полностью управляется системой автоматизации, позволит снизить годовые эксплуатационные затраты перевозчика и себестоимость 1 км пробега на 36,2% и 34,4% соответственно.

Небольшая разница в эффекте между сценариями 1 и 4 (сокращение годовых эксплуатационных затрат перевозчика и себестоимости 1 км пробега составляют 15,1% и 17% соответственно) позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на снижение эксплуатационных затрат оказывает синергетический эффект в виде сокращения необходимого количества ТС в совокупности с сокращением оплаты труда водителей.

На рис. 7–9 приведена структура эксплуатационных затрат для рассматриваемых сценариев.

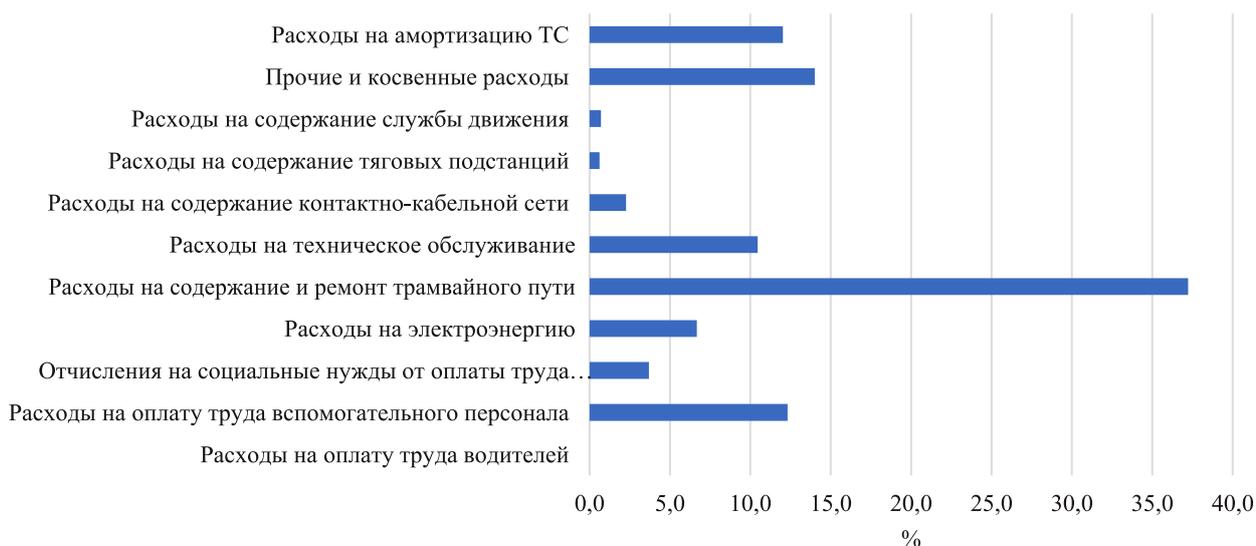
На рис. 7–9 видно перераспределение процентного соотношения статей затрат. По-прежнему во всех сценариях самой большой статьей затрат остаются затраты на содержание и ремонт трамвайного пути, размер которой в абсолютном выражении не изменяется и составляет постоянную величину, поскольку зависит от длины трамвайного пути, по которому проходит маршрут. При этом затраты на оплату труда персонала с отчислениями (водителей, кондукторов, вспомогательного персонала) от сценария к сценарию меняются. В Сценарии 2 они составляют 16,7%, в Сценарии 3 — 8,6%, а в Сценарии 4 — 16,0%.



**Рис. 7.** Структура эксплуатационных затрат для Сценария 2 (работают 2 трамвая, сохранена статья затрат на оплату труда водителей и кондукторов)



**Рис. 8.** Структура эксплуатационных затрат для Сценария 3 (работают 2 трамвая, отсутствует статья затрат на оплату труда водителей, но сохранена статья затрат на оплату труда вспомогательного персонала)



**Рис. 9.** Структура эксплуатационных затрат для Сценария 4 (работают 5 трамваев, отсутствует статья затрат на оплату труда водителей, но сохранена статья затрат на оплату труда вспомогательного персонала)

### Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать вывод что, используя трамвайные вагоны с автоматизированной системой управления, перевозчик может получить эффекты:

- от снижения эксплуатационных затрат за счет уменьшения времени проезда трамваями оборотного рейса (на 55,4%) и, как следствие, сокращение потребно-

го количества трамваев (на 60%), для выполнения того же объема транспортной работы;

- от снижения эксплуатационных затрат, в связи с отсутствием необходимости использования водителя (в среднем на 15%), даже при том, что стоимость приобретения ТС, оборудованных средствами автоматизации, значительно повышается.

Однако максимальный эффект от внедрения автоматизированного управления можно получить в синергии двух вышеперечисленных эффектов.

В результате проведенного исследования влияния различных факторов на эффективность внедрения автоматизированных систем управления ТС ГПТ (на примере трамвайного маршрута № 19) можно сделать и ряд общих выводов:

1. Один из основных аргументов в пользу автоматизации управления ТС состоит в снижении потребного количества ТС, необходимого для выполнения заданной транспортной работы. В свою очередь, это позволяет снизить эксплуатационные затраты в целом, в том числе за счет снижения расходов на заработную плату водителей. При этом, внедряя полностью автоматизированные ТС и отказываясь от статьи затрат на оплату труда водителей, можно получить еще больший эффект от синергии этих эффектов.

2. В различных странах доля расходов на заработную плату водителей в общих затратах на обслуживание ТС составляет от 40 % до 70 %, в России это значение находится около 30 %.

3. Ожидается, что в ближайшее время в России процесс автоматизации ТС ГПТ сможет оказать достаточно сильное влияние на снижение эксплуатационных расходов перевозчика.

4. Внедрение ТС с автоматизированным управлением позволит получить потенциальные возможности не только для сокращения расходов на эксплуатацию ТС, но и оптимизировать требуемые ресурсы.

В будущих исследованиях оценки эффективности автоматизации управления ТС следует проанализировать и другие аспекты, такие как эффект для пользователя ГПТ, затраты на разработку и внедрение автоматизации, преимущества в плане безопасности, более детально учесть степень автономности. ▲

#### Библиографический список

- Gorev A., Solodkiy A., Popova O., et al. Formation of priority movement corridors of urban passenger transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 632, International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering 27 May to 1 June 2019, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia 10.1088/1757-899X/632/1/012013.
- Горев А. Э. Основные задачи развития пассажирского транспорта общего пользования в Санкт-Петербурге // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 3–4 (88–89). С. 59–62. EDN RJLSKC.
- The Autonomous Simens tram / Andrew W. Palmer; Albi Sema; Wolfram Martens; Peter Rudolph; Wolfgang Waizenegger // 2020 IEEE 23<sup>rd</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 20–23 September 2020. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294699.
- Городской транспорт. Система помощи машинисту на базе искусственного интеллекта COGNITIVE TRAM PILOT [Электронный ресурс]. URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/?ysclid=Islajhtio9436736255> (дата обращения: 15.02.2024).
- Нормативное регулирование эксплуатации беспилотных транспортных средств: состояние и перспективы / С. В. Жанказиев, А. И. Воробьев, А. Ю. Забудский [и др.] // Информационные технологии и инновации на транспорте: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Орел, 22–23 мая 2019 года / Под общей редакцией А. Н. Новикова. Орел: Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2020. С. 190–198. EDN CWQOSA.
- Pierre Verzat, Pierre Gosset. Automated and Autonomous Public Transport Possibilities, Challenges and Technologies. — SYSTRA, 20 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated\\_and\\_autonomous\\_public\\_transport\\_2018.pdf](https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated_and_autonomous_public_transport_2018.pdf) (дата обращения: 20.02.2024).
- Technical Description of the SIRIO Platform Vehicle. AnsaldoBreda, 92 p.
- SAE J3016 2018 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE, 2021. 35 p.
- IEC 62290–1 Railway applications — Urban guided transport management and command/control systems — Part 1: System principles and fundamental concept. Edition 2.0, IEC, 2014. 13 p.
- Приказ Минтранса РФ от 20 октября 2021 г. № 351 «Об утверждении Порядка определения начальной (максимальной) цены контракта, а также цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), при осуществлении закупок в сфере регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом».
- Wadud Z. Fully automated vehicles: a cost of ownership analysis to inform early adoption // Transp. Res. A Policy Pract. 101. 2017. P. 163–176.

12. Wadud Z., MacKenzie D., Leiby P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles // *Transp. Res. A Policy Pract.* 86. 2016. P. 1–18.
13. Jansson J. O. A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size // *J. Transp. Econ. Policy.* 1980. 14 (1). P. 53–80.
14. Ongel A., Loewer E., Roemer F., et al. Economic assessment of autonomous electric microtransit vehicles. *Sustainability* 11 (3), 2019 [Электронный ресурс]. URL: Sustainability | Free Full-Text | Economic Assessment of Autonomous Electric Microtransit Vehicles (mdpi.com) (дата обращения: 21.02.2024).
15. National Guidelines for Transport System Management in Australia, vol. 4. Urban Transport. Australian Transport Council, 2006 [Электронный ресурс]. URL: PPT — National Guidelines for Transport System Management in Australia PowerPoint Presentation — ID:7087241 (slideserve.com) (дата обращения: 22.02.2024).
16. Abe R. Introducing autonomous buses and taxis: quantifying the potential benefits in Japanese transportation systems // *Transp. Res. A Policy Pract.* 126. 2019. P. 94–113.
17. Tirachini A., Antoniou C. The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy. *Economics of Transportation* 21 (2020) 100151.
18. Bosch P. M., Becker F., Becker H., et al. Cost-based analysis of autonomous mobility services // *Transp. Policy* 64. 2018. P. 76–91.
19. Kyriakidis M., de Winter J. C. F., Stanton N., et al. A human factors perspective on automated driving // *Theor. Issues Ergon. Sci.* 20 (3). 2019. P. 223–249.
20. Lazarus J., Shaheen S., Young S. E., et al. Shared Automated Mobility and Public Transport // *Road Vehicle Automation*. 2018. Vol. 4. P. 141–161.
21. Almlöf E., Nybacka M., Pernestål A., et al. Will leisure trips be more affected than work trips by autonomous technology? Modelling self-driving public transport and cars in Stockholm // *Transportation Research Part A Policy and Practice* 165. 2022. P. 1–19.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 1, P. 32–51*  
 DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-32-51

### Effectiveness of automated vehicle control in tram systems

#### Information about authors

**Gorev A. E.**, Doctor of Economics, Professor. E-mail: a-gorev@mail.ru

**Popova O. V.**, PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: o-popova@mail.ru

**Plotnikov D. G.**, PhD in Engineering, Associate Professor.

E-mail: dg-plotnikov@mail.ru

**Oleshchenko E. M.**, PhD in Engineering, Associate Professor.

E-mail: oleshchenko.elena@mail.ru

Higher School of Transport of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**Abstract.** The components of the effect that can be obtained by implementing autonomous control of rolling stock in tram systems of urban transport are described. The components of the effect are considered depending on the level of automated control adopted in domestic and international regulatory documentation. The article analyzes data on travel time between stopping points on the tram route in different periods of time. The cost level is calculated according to four scenarios: 1) the tram does not have automated control systems; 2) the tram is equipped with an automated control system with a high level of automation, the track is maximally isolated from automobile traffic with priority for traffic lights and the driver is still present on it; 3) similar to the previous one, but the tram is equipped with an automated control system with a full level of automation (without a driver); 4) similar to the previous one, but without infrastructure modernization. Based on the study, we can conclude that by using tram cars with an automated control system, a carrier can benefit from reduced operating costs by reducing the travel time of trams on a return trip and, as a consequence, reducing the required number of trams to perform the same volume of transport work and from reduction in operating costs, due to the absence of the need to use a driver, even though the cost of purchasing trams equipped with automation equipment increases significantly. However, the maximum effect from the introduction of automated control can be obtained in the synergy of the two above effects.

**Keywords:** autonomous control; tram traffic; management efficiency; automated control system; autonomous driving; tram route.

#### References

1. Gorev A., Solodkiy A., Popova O., Ospanov D. Formation of priority movement corridors of urban passenger transport // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 632, International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering 27 May to 1 June 2019, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia 10.1088/1757-899X/632/1/012013.
2. Gorev A. E. Osnovnye zadachi razvitiya passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya v Sankt-Peterburge // *Transport Rossijskoj Federacii*. 2020. № 3–4 (88–89). S. 59–62. EDN RJLSKC.
3. The Autonomous Siemens tram / Andrew W. Palmer; Albi Sema; Wolfram Martens; Peter Rudolph; Wolfgang Waizenegger // 2020 IEEE 23<sup>rd</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 20–23 September 2020. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294699.
4. Gorodskoj transport. Sistema pomoshchi mashinistu na baze iskusstvennogo intellekta COGNITIVE TRAM PILOT. URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/?ysclid=Islajhtio9436736255> (data obrashcheniya: 15.02.2024).
5. Normativnoe regulirovanie ekspluatatsii bespilotnyh transportnyh sredstv: sostoyanie i perspektivy / S. V. ZHankaziev, A. I. Vorob'ev, A. YU. Zabudskij [i dr.] // *Infor-macionnye tekhnologii i innovacii na transporte: Materialy 5-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Oryol, 22–23 maya 2019 goda / Pod obshchey redakciej A. N. Novikova. Oryol: Orlovskij gosudarstvennyj universitet im. I. S. Turgeneva*, 2020. S. 190–198. EDN CWQOSA.
6. Pierre Verzat, Pierre Gosset. Automated and Autonomous Public Transport Possibilities, Challenges and Technologies. — SYSTRA, 20 p. URL: [https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated\\_and\\_autonomous\\_public\\_transport\\_2018.pdf](https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated_and_autonomous_public_transport_2018.pdf) (data obrashcheniya: 20.02.2024).
7. Technical Description of the SIRIO Platform Vehicle. AnsaldoBreda, 92 p.
8. SAE J3016 2018 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On Road Motor Vehicle Au-tomated Driving Systems, SAE, 2021. 35 p.

9. IEC 62290–1 Railway applications — Urban guided transport management and command/control systems — Part 1: System principles and fundamental concept. Edition 2.0, IEC, 2014. 13 p.
10. Prikaz Mintransa RF ot 20 oktyabrya 2021 g. № 351 "Ob utverzhdenii Poryadka opredele-niya nachal'noj (maksimal'noj) ceny kontrakta, a takzhe ceny kontrakta, zaklyuchaemogo s edinstvennym postavshchikom (podryadchikom, ispolnitelem), pri osushchestvlenii zakupok v sfere regul'yarnyh perevozk pas-sazhirov i bagazha avtomobil'ny'm transportom i gorodskim nazemnym elek-tricheskim transportom".
11. Wadud Z. Fully automated vehicles: a cost of ownership analysis to inform early adoption // *Transp. Res. A Policy Pract.* 101. 2017. P. 163–176.
12. Wadud Z., MacKenzie D., Leiby P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles // *Transp. Res. A Policy Pract.* 86. 2016. P. 1–18.
13. Jansson J. O. A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size // *J. Transp. Econ. Policy* 14 (1). 1980. P. 53–80.
14. Ongel A., Loewer E., Roemer F., et al. Economic as-sessment of autonomous electric microtransit vehicles. *Sustainability* 11 (3), 2019. URL: Sus-tainability | Free Full-Text | Economic Assessment of Autonomous Electric Microtransit Vehi-cles (mdpi.com) (data obrashcheniya: 21.02.2024).
15. National Guidelines for Transport System Management in Australia, vol. 4. Urban Transport. Australian Transport Council, 2006. URL: PPT — National Guidelines for Transport System Management in Australia PowerPoint Presentation — ID:7087241 (slideserve.com) (data obrashcheniya: 22.02.2024).
16. Abe R. Introducing autonomous buses and taxis: quantifying the potential ben-efits in Japanese transportation systems // *Transp. Res. A Policy Pract.* 126. 2019. P. 94–113.
17. Tirachini A., Antoniou C. The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy // *Economics of Transportation* 21 (2020) 100151.
18. Bosch P.M., Becker F., Becker H., et al. Cost-based analysis of autonomous mo-bility services // *Transp. Policy* 64. 2018. P. 76–91.
19. Kyriakidis M., de Winter, J. C. F., Stanton N., et al. A human factors perspective on automated driving // *Theor. Issues Ergon. SCI.* 20 (3). 2019. P. 223–249.
20. Lazarus J., Shaheen S., Young S. E., et al. Shared Automated Mobility and Public Transport // *Road Vehicle Automation*. 2018. Vol. 4. P. 141–161.
21. Almlöf E., Nybacka M., Pernestål A., et al. Will leisure trips be more affected than work trips by autonomous technology? Modelling self-driving public transport and cars in Stockholm // *Transportation Research, Part A Policy and Practice* 165. 2022. P. 1–19.