



УДК 629.4.086

Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда

О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Валинский О. С., Марикин А. Н., Калинин Н. П., Суханов Е. В. Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 7–18. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18

Аннотация

Цель: Разработка и исследование алгоритма системы автоведения для высокоскоростных поездов с учетом требований энергоэффективности, точности соблюдения графика движения, повышения безопасности и комфорта пассажиров. **Методы:** Применен аналитический и программно-расчетный подходы к проектированию алгоритма автоведения. Для моделирования движения электропоезда использован метод конечных элементов. Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотек NumPy, Pandas и Matplotlib. Проанализированы данные движения высокоскоростного поезда «Сапсан», проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных. **Результаты:** Разработан алгоритм системы автоведения, позволяющий повысить энергоэффективность и точность соблюдения графика движения, а также снизить субъективное влияние машинистов на энергозатраты. Зафиксирован эффект экономии электроэнергии на 11 % и более при различной интенсивности движения от внедрения системы. Представлены результаты моделирования кривой движения в сравнении с экспериментальными эксплуатационными данными. **Практическая значимость:** Внедрение предложенного алгоритма автоведения позволит повысить энергоэффективность работы высокоскоростных поездов, улучшить эксплуатационные характеристики, увеличить точность соблюдения графиков движения и повысить уровень комфорта пассажиров. Разработанная система может быть применена на магистралях с высокой интенсивностью движения для повышения пропускной способности без модернизации инфраструктуры.

Ключевые слова: высокоскоростной поезд, система автоведения, энергоэффективность, автоматизированное управление, алгоритм автоведения, оптимизация движения, железнодорожный транспорт.

Введение

Развитие высокоскоростных железных дорог меняет устоявшийся уклад в пассажирском транспортном секторе. Ключевые факторы, такие как комфорт, доступность, уровень обслуживания и сокращение времени в пути, становятся опреде-

ляющими при выборе транспорта пассажирами, что в случае с высокоскоростной железной дорогой дает преимущество относительно авиаперевозок на небольших расстояниях [1].

Однако рост пассажиропотока на данный вид транспорта ставит перед отраслью новые

вызовы. Для удовлетворения спроса необходимо увеличивать количество выполняемых рейсов на линии движения, что, в свою очередь, повышает нагрузку на железнодорожную инфраструктуру. Высокая интенсивность движения поездов требует более эффективного управления движением для обеспечения безопасности и максимальной пропускной способности железной дороги. Интенсивный график движения поездов без предварительного расчета модели движения неизбежно приводит к нерациональному расходу электроэнергии [2], но даже с учетом детальных расчетов невозможно точно спрогнозировать влияние всех динамических факторов, действующих на движение высокоскоростного поезда в реальных условиях, что существенно затрудняет оптимизацию энергопотребления. Необходимо применение адаптивных систем управления, способных в режиме реального времени оперативно реагировать на изменения условий эксплуатации и выбирать оптимальный режим ведения поезда.

Системы автоматизированного управления предлагают решение данных задач. Автоведение позволяет выбрать рациональный режим движения поезда, повышая точность соблюдения расписания и снижая энергопотребление без ущерба для безопасности и комфорта пассажиров [3]. В результате железнодорожная инфраструктура высокоскоростного транспорта становится более эффективной, способной удовлетворить растущий спрос пассажиров. Это, в свою очередь, делает железнодорожный транспорт еще более привлекательным для пассажиров и позволяет ему удерживать конкурентные позиции на рынке.

Несмотря на активное развитие систем автоведения, они все еще имеют ряд недостатков, ограничивающих их эффективность. Одной из ключевых проблем является недостаточная адаптивность к изменяющимся условиям. Кроме того, многие системы требуют мощного технического оборудования из-за неоптимизированного алго-

ритма работы, что может приводить к задержке в обработке и ошибкам в управлении. Проблемы также возникают с точностью моделирования, а это напрямую влияет на качество управления. Неоптимальные алгоритмы прогнозирования и слабая способность к самокоррекции снижают энергоэффективность, а отсутствие стабильного результата работы автоведения делает системы невостребованными у машинистов. Все это указывает на необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов автоматизированного управления, способных гибко адаптироваться к реальным условиям эксплуатации [4].

Преимущества систем автоведения

В современной практике железнодорожных перевозок для обеспечения безопасности, соблюдения расписания и повышения энергоэффективности движения поездов применяются два основных метода управления: режимные карты и применение систем автоведения.

Использование режимных карт — это традиционный метод, основанный на предварительных расчетах на стационарном компьютере оптимальных режимов движения для всего профиля пути. Полученные данные заносятся в режимную карту, которая служит для машиниста своеобразной инструкцией по ведению поезда. Статический характер режимных карт не позволяет эффективно учитывать динамику реальных условий движения, что приводит к существенным расхождениям между расчетными и фактическими показателями. Для повышения точности прогнозирования требуется более гибкий подход, учитывающий изменения профиля пути, погодных условий и других факторов, влияющих на движение поезда.

Современные системы автоведения представляют собой комплексы программного обеспечения и бортового оборудования, обеспечивающие автоматизированное управление движением поезда в соответствии с заданным графиком

движения и с учетом текущих условий эксплуатации и обстановки. Встроенные алгоритмы оптимизации позволяют выбирать наиболее энергоэффективный режим движения в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям. Системы автоведения используют датчики, с которых непрерывно считывают информацию о состоянии поезда, пути и окружающей среде. На основе этих данных система принимает решения о скорости движения, тяге двигателей и других параметрах, обеспечивая соблюдение графика и оптимальное использование электроэнергии [5].

Преимущества систем автоведения:

- Повышение безопасности. Автоматизированное управление снижает вероятность ошибок машиниста и повышает безопасность движения.

- Высокая точность. Благодаря непрерывной адаптации к изменяющимся условиям системы автоведения обеспечивают более точное соблюдение графика движения и более эффективное использование энергии по сравнению с традиционными методами.

- Снижение нагрузки на машиниста. Автоматизация рутинных операций позволяет машинисту сосредоточиться на контроле над системой и принятии решений в нестандартных ситуациях.

- Экологичность. Экономия электроэнергии способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Можно выделить следующие уровни автоматизации управления поездом:

- Сочетание ручного управления и автоматического контроля. Машинист осуществляет непосредственное управление поездом, в то время как система непрерывно отслеживает его действия и в случае отклонения от допустимых параметров автоматически вмешивается в процесс управления, предотвращая возникновение аварийных ситуаций.

- Полуавтоматическое управление. Подразумевает разделение функций между машинистом и автоматическими системами: машинист при-

нимает стратегические решения и осуществляет общий контроль над движением, в то время как автоматические системы выполняют рутинные операции, такие как поддержание скорости, торможение и следование по заданному маршруту.

- Автоматизированное управление с функцией ручного вмешательства. В обычной эксплуатации поезд управляется системой автоведения и машинист выступает в роли наблюдателя, готового вмешаться в процесс управления в случае непредвиденных обстоятельств или неисправностей системы.

- Автоматическое управление. Все функции управления, включая контроль скорости, соблюдение маршрута и экстренное торможение, возложены на бортовые компьютеры и датчики, а машинист отсутствует в кабине. Оператор, который может вмешаться в управление поездом, находится в специализированном центре и отслеживает движение поезда [6].

Отсутствие системы контроля энергоэффективности движения подвижного состава приводит к отклонениям от оптимальных режимов ведения, что выражается в субъективном выборе машинистами режимов движения и отсутствии четкого планирования энергопотребления. Для визуализации различий в кривых движения разных рейсов на рис. 1 представлено семейство расшифрованных данных параметров движения высокоскоростного поезда для участка между двумя остановками.

Результаты предварительных исследований показывают, что внедрение систем автоведения позволит не только сократить энергопотребление и повысить точность соблюдения графика, но и улучшить условия труда персонала, а также повысить пропускную способность линий без необходимости масштабной модернизации инфраструктуры [7].

Таким образом, системы автоведения являются перспективным направлением развития железнодорожного транспорта, позволяющим повысить его эффективность и безопасность.

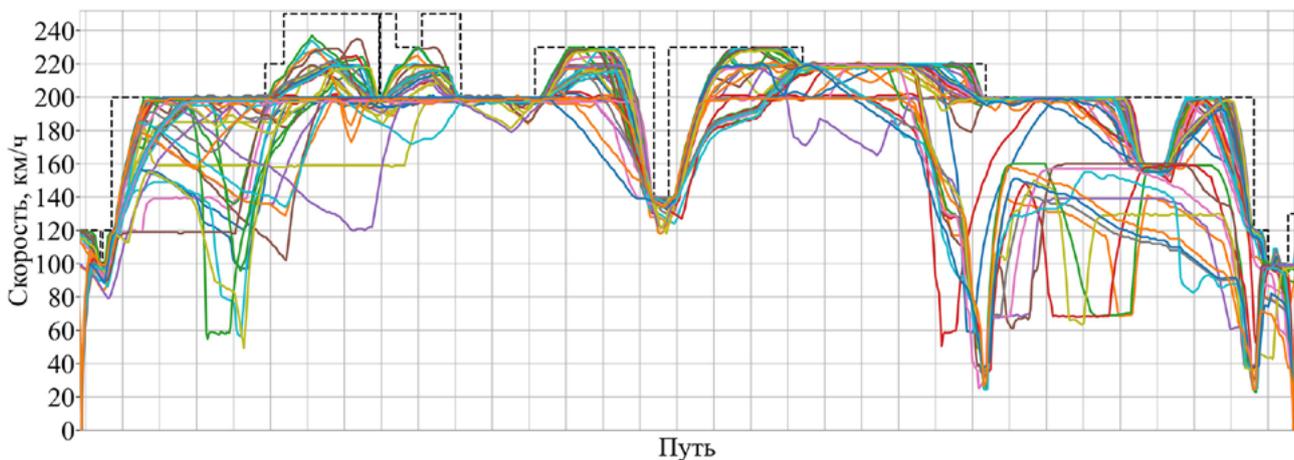


Рис. 1. Семейство расшифрованных данных параметров движения высокоскоростного поезда для участка между двумя остановками

Требования к системам автоведения высокоскоростного движения

Для успешной эксплуатации системы автоведения высокоскоростного поезда необходимо разработать определенные требования к программе на этапе разработки, которые будут определять основную логику работы алгоритма [8].

В общем виде алгоритмы систем управления автоведением можно классифицировать на два типа: системы, основанные на моделировании движения электропоезда (предиктивные), и системы, функционирующие без моделирования (реактивные).

В первом случае система принимает решения исключительно на основе текущих данных (скорости, положения поезда, сигналов с инфраструктуры и прочих) и не моделирует будущее движение поезда. Любые изменения в движении производятся в ответ на поступающие сигналы без расчета долгосрочных последствий. Такой подход в разработке автоведения идеально подходит для следования на линии согласно режимным картам, в которых будут четко указаны инструкции для выполнения определенной логики движения. Реактивные системы обладают рядом

серьезных ограничений, особенно для высокоскоростных поездов:

- Низкий уровень безопасности при торможении. Без прогнозирования длины тормозного пути, который значительно увеличивается для высокоскоростных поездов, система может не успеть вовремя снизить скорость движения, что повышает риск возникновения аварийных ситуаций. Это обусловлено тем, что необходимое время для замедления поезда может превышать доступное, оставшееся до прохождения критической точки.

- Низкий уровень безопасности при сложных скоростных ограничениях. В условиях эксплуатации высокоскоростных поездов на участках с переменным скоростным режимом системы управления, функционирующие без прогнозирования, обеспечивают недостаточную точность соблюдения установленных скоростных ограничений. Это обусловлено тем, что такие системы не способны учитывать динамику изменения скоростного режима на последующих участках пути.

- Погрешности в точности движения. В случае отклонения от графика движения система управления не будет корректировать скорость и продолжит выполнение заданного алгоритма.

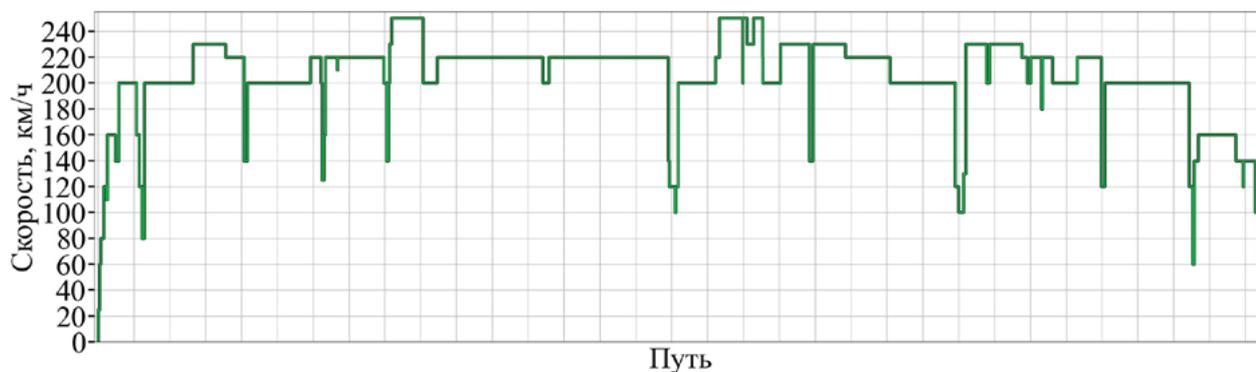


Рис. 2. Пример действующих ограничений скорости на участке движения

– Низкая энергоэффективность. Реактивные системы не учитывают характеристики профиля пути и не могут подобрать режимы движения, минимизирующие расход энергии.

– Низкий уровень комфорта. Динамика движения высокоскоростных поездов характеризуется постоянным изменением ускорения, обусловленным профилем пути и установленным графиком движения. Реактивные системы не могут обеспечить плавность изменения скорости, что приводит к резким перепадам ускорения.

Применение предиктивной системы управления позволяет устранить вышеуказанные недостатки за счет моделирования движения для всего профиля пути. Данная система выполняет комплексный расчет модели движения для определения параметров поезда в каждой точке пути и, таким образом, способна рассчитать управляющие воздействия для достижения целевых параметров движения в заданной координате с учетом всех эксплуатационных условий.

Несмотря на преимущества предиктивных систем, использование реактивного управления может быть оправдано в определенных ситуациях, таких как возникновение непредвиденных обстоятельств, требующих экстренного реагирования.

Помимо глобальной логики работы необходимо выделить следующие ключевые требования для алгоритма автоведения, учитывающие особенности эксплуатации высокоскоростных поездов:

1. Соблюдение временных и постоянных ограничений скорости профиля пути, обусловленных инфраструктурными ограничениями или требованиями безопасности. На данных участках движение поезда должно осуществляться со скоростью, не превышающей установленный предел. Пример ограничений скорости представлен на рис. 2.

2. Минимальные временные погрешности при движении по участкам пути согласно установленному графику. Любые отклонения во времени прибытия в контрольные точки должны быть в пределах допустимых погрешностей, а в идеале стремиться к нулю.

3. Обеспечение плавности изменения скорости и режимов движения. При моделировании движения электропоезда можно заранее установить в системе плавное изменение ускорения для повышения комфорта пассажиров во время движения.

4. Реализация прицельного рекуперативного торможения [9]. Система должна самостоятельно определять участки пути, для которых необходимо выполнить снижение скорости, согласно ограничениям скорости и заданным остановочным пунктам, и выполнять построение плавного торможения с помощью рекуперативного тормоза для повышения энергоэффективности движения. В ситуациях с тяжелым профилем допускается дополнительное включение реостатного и пневматического торможения, если это не идет в разрез с требованиями безопасности.

5. Динамический расчет оптимального выбора комбинации режимов движения для снижения энергозатрат и повышения энергоэффективности движения при соблюдении установленного графика. Предварительный расчет времени прибытия предоставляет системе возможность гибкого управления режимами ведения поезда. При наличии временного резерва автоведение может рационально корректировать скорость движения, выбирая оптимальную комбинацию режимов ведения с учетом скоростных ограничений и профиля пути.

6. Перерасчет оптимальной траектории движения в режиме реального времени. Алгоритм автоведения должен иметь возможность производить бесконечные итерационные вычисления модели движения для постоянной адаптации к текущим условиям эксплуатации.

7. Быстродействие программы для минимальной задержки в обработке данных и принятии решений в условиях высоких скоростей движения.

Скорость работы программы автоведения зависит от характеристики установленного программного обеспечения и технического оборудования. По уровню нагрузки на вычислительную систему алгоритм можно классифицировать следующим образом:

1. Системы с постоянным пересчетом модели движения. Такие системы часто называют адаптивными системами управления в реальном времени (Real-Time Adaptive Control). Они работают по принципу мгновенного реагирования на изменения и непрерывно обновляют оптимальный режим движения в каждый момент времени на основе поступающих данных. Данный подход основан на применении высокопроизводительных вычислительных ресурсов, так как требуется постоянный перерасчет сложных моделей.

Из преимуществ можно выделить максимальную точность и быстроту реакции. Хорошо подходят для сценариев с высокой динамичностью,

например при изменениях сигналов или аварийных ситуациях. К недостаткам можно отнести высокие требования к вычислительной мощности, но главной проблемой является подверженность нестабильности из-за постоянного обновления данных — система совершает резкие корректирующие действия, пытаясь адаптироваться к каждому незначительному изменению [10].

2. Системы с периодической проверкой отклонений. Обычно их называют системами дискретного адаптивного управления (Discrete Adaptive Control) или системами управления на основе событий. Эти системы работают по принципу периодического мониторинга и коррекции. Программа проверяет параметры движения с заданным интервалом времени или при наступлении определенного события, например резкого изменения скорости. Если выявляется отклонение от заранее рассчитанных зависимостей, запускается процесс пересчета. В остальное время поезд движется согласно модели.

К преимуществам данной системы можно отнести снижение нагрузки на вычислительную систему и более стабильную работу за счет сглаживания мелких изменений. Недостатком является небольшая временная задержка в реакции. Величина задержки для проверки устанавливается вручную, что позволяет найти компромисс между двумя подходами [11].

На практике чаще всего применяются гибридные системы, которые сочетают оба подхода: система работает по принципу периодического пересчета маршрута, например каждые 5 секунд, а в критических ситуациях, в частности при резком торможении, она переходит в режим постоянного пересчета. Этот подход позволяет обеспечить баланс между высокой точностью, стабильностью и скоростью реакции, не перегружая вычислительную инфраструктуру.

Выше в статье были определены основные требования, которые должны быть удовлетво-

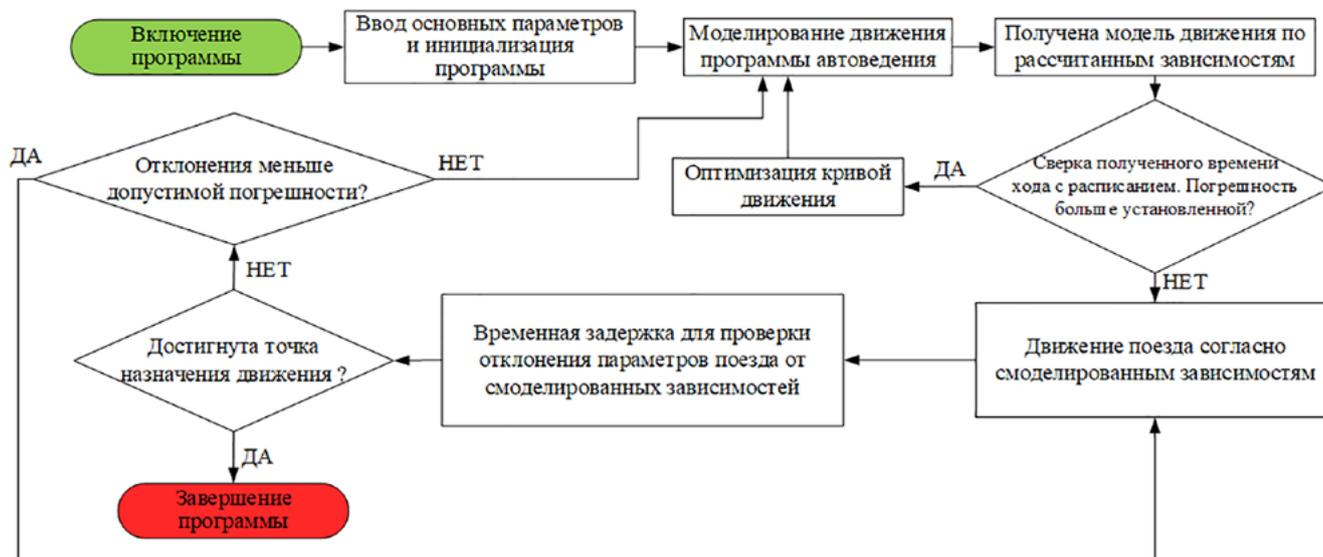


Рис. 3. Упрощенная блок-схема работы алгоритма

рены для эффективной работы системы автоведения. Теперь рассмотрим один из возможных подходов к реализации внутренней логики работы алгоритма, основанной на принципе метода конечных элементов [12]. Суть заключается в дискретном представлении движения электропоезда в виде совокупности фрагментов профиля пути, для каждого из которых рассчитывается модель движения с учетом его характеристик (длина, уклон) и действующих скоростных ограничений. Интеграция результатов по участкам формирует полную модель движения. Данный подход позволяет учесть все особенности профиля пути при расчете движения. Для определения оптимального режима ведения с учетом установленного времени хода программа должна изначально провести расчет с максимальным тяговым усилием, а далее оптимизировать модель движения согласно установленному временному профициту.

После составления требований к работе программы в рамках научного исследования был разработан полноценный алгоритм автоведения [13, 14], написанный на языке Python с подключением дополнительных библиотек: NumPy, Pandas, Matplotlib [15, 16]. Общую работу предложенного

алгоритма автоведения можно представить в виде упрощенной блок-схемы, изображенной на рис. 3.

Для инициализации программы необходим следующий набор входных данных: попикетный продольный профиль пути, установленные ограничения скорости, технические характеристики электропоезда (масса, тягово-энергетические характеристики, основное сопротивление движению и др.), а также расписание движения. После введения исходных данных программа начинает производить итерационные вычисления по построению движения поезда в координатно-скоростной плоскости. В процессе движения программа сверяет текущие параметры поезда со смоделированными значениями для адаптации движения в случае отклонения. По достижении точки назначения программа должна завершить свою работу.

На выходе программы автоведения в каждый момент времени выдается «инструкция» для движения, представляющая собой вычисленные зависимости, которым высокоскоростной поезд должен следовать, чтобы прибыть точно по графику и проехать безопасно и энергоэффективно.

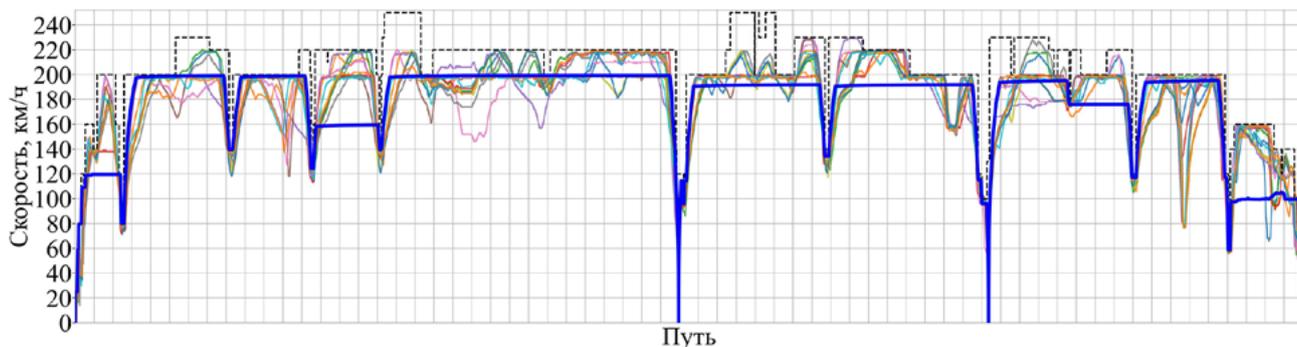


Рис. 4. Модель движения поезда в сравнении с экспериментальными эксплуатационными данными (синяя линия — модель автоведения, тонкие линии — семейство экспериментальных эксплуатационных данных)

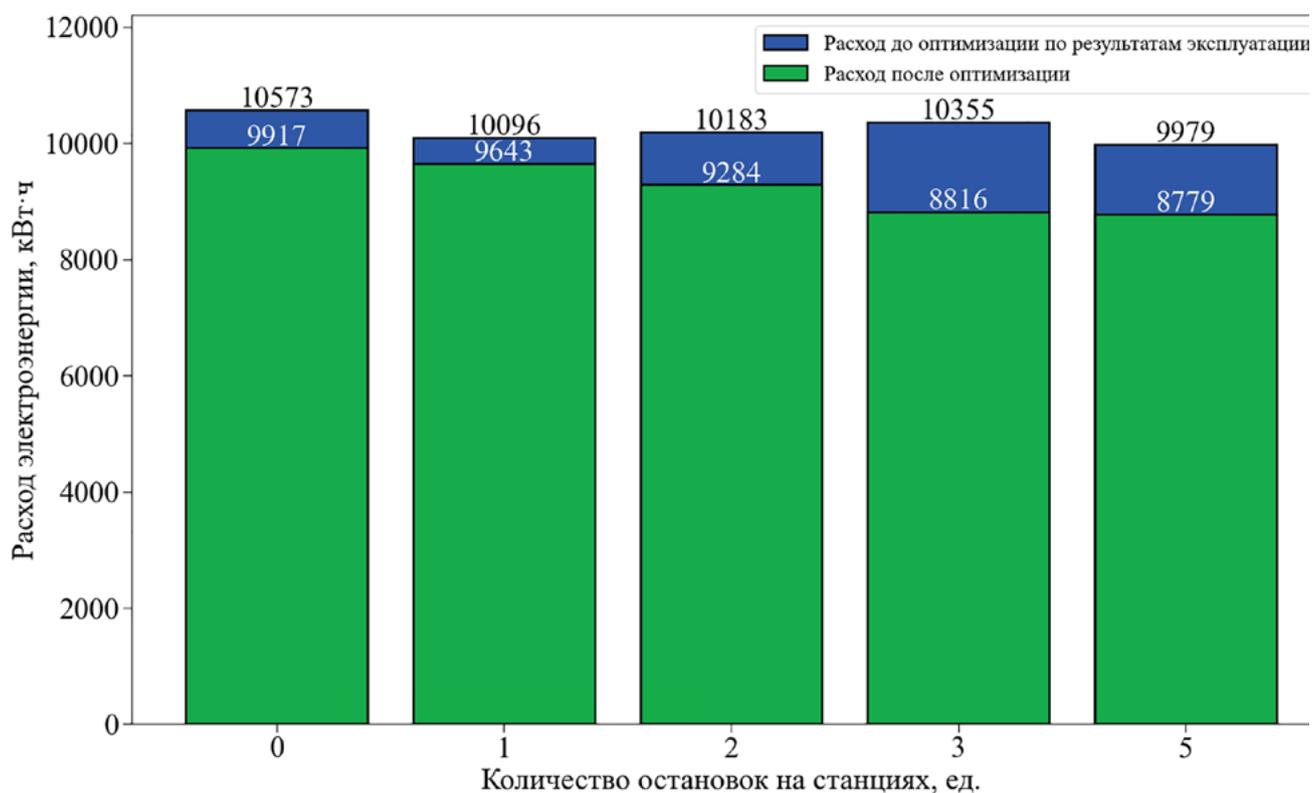


Рис. 5. Расчетный расход электроэнергии при применении алгоритма автоведения относительно фактического расхода

Пример модели движения предложенной программы автоведения в сравнении с экспериментальными эксплуатационными данными представлен на рис. 4.

После анализа результатов работы разработанного алгоритма автоведения и сравнения с экспериментальными данными рейсов за несколько

последних лет было установлено, что применение системы автоматизированного управления позволит оптимизировать выбор комбинации режимов движения высокоскоростного электропоезда, значительно снижая энергетические затраты. Проведенные программно-расчетные исследования фиксируют снижение фактического расхода

электроэнергии на 11 % и более при различной интенсивности движения.

Согласно собранной экспериментальной аналитике движения электропоезда «Сапсан» за период последних двух лет были рассчитаны средние значения расхода электроэнергии в зависимости от количества остановок. Полученные результаты фактического расхода и расчетного расхода на основе разработанного алгоритма в зависимости от количества остановок представлены на рис. 5.

Выводы

1. Применение системы автоведения обеспечивает снижение энергозатрат на 11 % и более при различной интенсивности движения.

2. Использование метода конечных элементов при проектировании алгоритма позволяет учитывать все особенности профиля пути и оперативно адаптировать режим движения.

3. Реализация алгоритма автоведения повышает точность соблюдения графика движения, что улучшает эксплуатационные характеристики высокоскоростных поездов. Предиктивное моделирование движения обеспечивает высокий уровень безопасности и комфорта пассажиров.

4. Применение гибридных систем управления, сочетающих постоянный и периодический переключения модели, позволяет достичь баланса между стабильностью работы, точностью расчетов и быстродействием системы.

5. Реализация алгоритма позволяет увеличить пропускную способность магистралей без дорогостоящей модернизации инфраструктуры, что особенно актуально при росте пассажиропотока.

6. В условиях интенсивного движения на высокоскоростных магистралях система автоведения может стать ключевым элементом повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта по сравнению с авиационными перевозками.

Список источников

1. Валинский О. С. Оценка энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта / О. С. Валинский, Н. П. Калинин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 4. — С. 7–14.

2. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справ.-метод. изд. / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. И. Иванов и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: Интехэнергоиздат, Теплоэнергетик, 2014. — 304 с.

3. ГОСТ Р 70059—2022. Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 150 с.

4. Авдиенко Е. Г. Обоснование функциональных возможностей системы автоведения электроподвижного состава при реализации беспилотных технологий на основе искусственного интеллекта / Е. Г. Авдиенко, Е. А. Третьяков // Молодая наука Сибири. — 2022. — № 2(16). — С. 55–62.

5. Баранов Л. А. Автоматическое управление движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 3(76). — С. 156–165.

6. Авдиенко Е. Г. Сравнительный анализ критериев оптимального движения электроподвижного состава с системой автоведения / Е. Г. Авдиенко, Е. А. Третьяков // Техника и технологии: пути инновационного развития: сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2022 года. — Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. — С. 24–27.

7. Зарифьян А. А. Оценка энергоэффективности электрической тяги методами компьютерного моделирования / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, В. В. Зак и др. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. — 2013. — № 1(65). — С. 24–37.

8. Разработка требований к программному обеспечению. 3-е изд., дополненное / Пер. с англ. — М.: Русская редакция; СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 736 с.
9. Плакс А. В. Анализ точности алгоритмов автоведения электропоездов: дисс. ... д-ратехн. наук / А. В. Плакс. — Л.: ЛИИЖТ, 1974.
10. Ие О. Н. Имитационное моделирование транспортных систем: программные средства и направления их совершенствования / О. Н. Ие // Актуальные вопросы современной экономики. — 2020. — № 5. — С. 428–439.
11. Ефремов А. Ю. ЕО-РТС: расширение функциональности системы управления движением поездов РТС / А. Ю. Ефремов // Железные дороги мира. — 2020. — № 3. — С. 61–65.
12. Каменев С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев. — Оренбург: ОГУ, 2019. — 110 с.
13. Свид. 2024688117 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Управляющая программа для системы автоведения высокоскоростного электропоезда ЭВС 1 и оптимизации его основных параметров движения / О. С. Валинский, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU). — № 2024687168; заявл. 12.11.2024; опубл. 25.11.2024.
14. Свид. 2024687177 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Управляющая программа для системы автоведения высокоскоростного электропоезда ЭВС 2 и оптимизации его основных параметров движения / О. С. Валинский, Н. П. Калинин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU). — № 2024690814; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.12.2024.
15. Лутц М. Изучаем Python / М. Лутц; пер. с англ. А. Киселева. 4-е изд. — СПб.: Символ-Плюс, 2011. — 1280 с.
16. Вандер Плас Дж. Python для сложных задач. Наука о данных / Дж. Вандер Плас; пер. с англ. Л. Киселевой. — СПб.: Sprint Book, 2024. — 592 с.
- Дата поступления: 08.01.2025
Решение о публикации: 17.02.2025

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — канд. техн. наук, проф.; rector@pgups.ru
МАРИКИН Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф.; marikin_s@mail.ru
КАЛИНИН Николай Павлович — аспирант, инженер; nikolaykalinin1997@gmail.com
СУХАНОВ Евгений Владимирович — аспирант; geneek123@gmail.com

Implementation of an Automatic Control System to Improve the Operation Accuracy and Energy Efficiency on High-Speed Electric Trains

O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin, E. V. Sukhanov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Valinsky O. S., Marikin A. N., Kalinin N. P., Sukhanov E. V. Implementation of an Automatic Control System to Improve the Operation Accuracy and Energy Efficiency on High-Speed Electric Trains // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 7–18. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-7-18

Summary

Purpose: To develop and evaluate an automatic train control algorithm for high-speed trains aiming at energy efficiency, timetable accuracy and increased passenger safety and comfort. **Methods:** An analytical

and computer-based approach was used to design an automatic control algorithm. The finite element method was used to simulate an electric train movement. The algorithm has been implemented in Python language using NumPy, Pandas and Matplotlib libraries. The Sapsan high-speed train operation data have been analysed and a comparative analysis of experimental and computational data has been carried out. **Results:** The automatic train control algorithm has been developed to improve energy efficiency and timetable accuracy, as well as to reduce the train driver impact on energy consumption. The effect of energy savings up to more than 11% in conditions of different traffic volumes due to the implementation of the system has been recorded. The results of the motion curve simulation compared with experimental operating data are presented. **Practical significance:** The implementation of the proposed automatic control algorithm will improve the energy efficiency of high-speed trains, enhance their operational characteristics, increase the train timetable accuracy and upgrade the level of passenger comfort. The developed system can be used on railways with high traffic intensity to increase railway capacity without upgrading the infrastructure.

Keywords: High-speed train, automatic control system, energy efficiency, automated control, automatic control algorithm, traffic optimization, railway transport.

References

1. Valinskiy O. S., Kalinin N. P. Otsenka energoeffektivnosti skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Energy efficiency assessment of high-speed and high-speed rail transport]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2024, Iss. 4, pp. 7–14. (In Russian)
2. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Ivanov B. I. et al. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: sprav.-metod. izd.; pod red. V. A. Gapanovicha* [Energy saving in rail transport: reference and method. ed.; edited by V. A. Gapanovich]. Moscow: Intekhenergoizdat, Teploenergetik Publ., 2014, 304 p. (In Russian)
3. GOST R 70059—2022. *Sistemy upravleniya i kontrolya zheleznodorozhnogo transporta dlya perevozk passazhirov v prigorodnom soobshchenii. Printsipy postroeniya i osnovnye funktsional'nye trebovaniya* [GOST R 70059—2022. Rail transport control and monitoring systems for suburban passenger transportation. Design principles and basic functional requirements]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2022, 150 p. (In Russian)
4. Avdienko E. G., Tret'yakov E. A. Obosnovanie funktsional'nykh vozmozhnostey sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava pri realizatsii bespilotnykh tekhnologiy na osnove iskusstvennogo intellekta [Justification of the functional capabilities of the automatic control system of electric rolling stock in the implementation of unmanned technologies based on artificial intelligence]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2022, Iss. 2(16), pp. 55–62. (In Russian)
5. Baranov L. A. Avtomaticheskoe upravlenie dvizheniem poezdov metropolitena [Automatic control of metro train traffic]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2018, vol. 16, Iss. 3(76), pp. 156–165. (In Russian)
6. Avdienko E. G., Tret'yakov E. A. Sravnitel'nyy analiz kriteriev optimal'nogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava s sistemoy avtovedeniya [Comparative analysis of the criteria for optimal movement of electric rolling stock with an automatic guidance system]. *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya: sbornik nauchnykh statey 11-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Kursk, 30 iyunya 2022 goda* [Engineering and technology: ways of innovative development: collection of scientific articles of the 11th International scientific and practical conference, Kursk, June 30, 2022]. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet Publ., 2022, pp. 24–27. (In Russian)
7. Zarif'yan A. A., Grebennikov N. V., Zak V. V. et al. Otsenka energoeffektivnosti elektricheskoy tyagi metodami komp'yuternogo modelirovaniya [Assessment of the energy efficiency of electric traction by computer modeling methods]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostoeroeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute

of Electric Locomotive Building]. 2013, Iss. 1(65), pp. 24–37. (In Russian)

8. *Razrabotka trebovaniy k programmnomu obespecheniyu. 3-e izd., dopolnennoe. Per. s angl.* [Development of software requirements. 3rd ed., supplemented. Transl. from English]. Moscow: Russkaya redaktsiya Publ.; SPb.: BKhV-Peterburg Publ., 2014, 736 p. (In Russian)

9. Plaks A. V. *Analiz tochnosti algoritmov avtovedeniya elektropoezdov: diss. ... d-ratekhn. nauk* [Analysis of the accuracy of algorithms for automatic control of electric trains: diss. ... Dr. of Technical Sciences]. L.: LIIZhT Publ., 1974. (In Russian)

10. Ie O. N. *Imitatsionnoe modelirovanie transportnykh sistem: programmnye sredstva i napravleniya ikh sovershenstvovaniya* [Simulation modeling of transport systems: software tools and directions for their improvement]. *Aktual'nye voprosy sovremennoy ekonomiki* [Actual issues of modern economics]. 2020, Iss. 5, pp. 428–439. (In Russian)

11. Efremov A. Yu. *EO-PTC: rasshirenie funktsional'nosti sistemy upravleniya dvizheniem poezdov PTC* [EO-PTC: expanding the functionality of the PTC train control system]. *Zheleznnye dorogi mira* [Railways of the world]. 2020, Iss. 3, pp. 61–65. (In Russian)

12. Kamenev S. V. *Osnovy metoda konechnykh elementov v inzhenernykh prilozheniyakh: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the Finite Element Method in Engineering Applications: a tutorial]. Orenburg: OGU Publ., 2019, 110 p. (In Russian)

13. Valinskiy O. S., Kalinin N. P., Sukhanov E. V. *Upravlyayushchaya programma dlya sistemy avtovedeniya vysokoskorostnogo elektropoezda EVS 1 i optimizatsii ego*

osnovnykh parametrov dvizheniya [Control program for the automatic control system of the high-speed electric train EVS 1 and optimization of its main driving parameters]. Svidetel'stvo RF, no. 2024688117, 2024. (In Russian)

14. Valinskiy O. S., Kalinin N. P. *Upravlyayushchaya programma dlya sistemy avtovedeniya vysokoskorostnogo elektropoezda EVS 2 i optimizatsii ego osnovnykh parametrov dvizheniya* [Control program for the automatic control system of the high-speed electric train EVS-2 and optimization of its main driving parameters]. Svidetel'stvo RF, no. 2024687177, 2024.

15. Lutts M. *Izuchaem Python; per. s angl. A. Kiseleva. 4-e izd.* [Learning Python; trans. from English by A. Kiseleva. 4th ed]. St. Petersburg: Simvol-Plyus Publ., 2011, 1280 p. (In Russian)

16. Vander Plas Dzh. *Python dlya slozhnykh zadach. Nauka o dannykh; per. s angl. L. Kiselevoy* [Python for Complex Problems. Data Science]. St. Petersburg: Sprint Book Publ., 2024, 592 p. (In Russian)

Received: January 08, 2025

Accepted: February 17, 2025

Author's information:

Oleg S. VALINSKY — PhD in Engineering, Professor; rector@pgups.ru

Alexander N. MARIKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; marikin_s@mail.ru

Nikolay P. KALININ — Postgraduate Student, Engineer; nikolaykalinin1997@gmail.com

Evgeniy V. SUKHANOV — Postgraduate Student; geneek123@gmail.com