

А. В. Черномазов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО УЧАСТКА БЕЛОРЕЧЕНСКАЯ – ТУАПСЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассмотрена концепция автоматизированной системы расчета допустимых межпоездных интервалов для электрифицированного участка Белореченская – Туапсе Северо-Кавказской железной дороги с использованием систем накопления электроэнергии. Показано, что одним из факторов, ограничивающих пропускную способность железнодорожных линий, являются режимы работы системы тягового электроснабжения, особенно на участках со сложным профилем пути и высокой интенсивностью движения поездов. Обоснована актуальность применения систем накопления энергии для приема избыточной энергии рекуперативного торможения и последующего использования ее на тягу поездов. Рассмотрены особенности участка Белореченская – Туапсе, характеризующегося значительными объемами рекуперативной энергии вследствие наличия затяжных спусков и подъемов. Представлена структура автоматизированной системы, включающая цифровую модель тяговой сети, подсистемы мониторинга поездной обстановки и состояния накопителей энергии, а также модули прогнозирования и расчета допустимых межпоездных интервалов. Показано, что использование цифрового двойника участка и методов машинного обучения позволяет повысить точность прогнозирования режимов работы системы тягового электроснабжения. Отмечены энергетические, экономические и экологические преимущества предлагаемого решения, включая повышение пропускной способности линии, сокращение задержек поездов, снижение потребления электроэнергии, уменьшение углеродного следа и повышение эффективности использования энергии рекуперации.

Ключевые слова: пропускная способность, межпоездной интервал, накопители энергии.

Для цитирования: Черномазов, А. В. Автоматизированная система расчета допустимых межпоездных интервалов электрифицированного участка Белореченская – Туапсе на основе использования систем накопления электроэнергии / А. В. Черномазов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 197–201. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_197.

Развитие железнодорожного транспорта в современных условиях характеризуется необходимостью одновременного решения нескольких стратегических задач: повышения пропускной способности инфраструктуры, увеличения энергоэффективности перевозочного процесса, снижения эксплуатационных затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Особую актуальность данные задачи приобретают для участков со сложным продольным профилем пути и высокой интенсивностью движения поездов.

Одним из таких участков является электрифицированный участок Белореченская – Туапсе Северо-Кавказской железной дороги, являющийся важнейшим элементом транспортного коридора, обеспечивающего перевозки в направлении портов Черноморского побережья. Для данного участка характерны значительные уклоны, большое количество тоннелей и кривых малого радиуса, что приводит к повышенным энергетическим нагрузкам

на систему тягового электроснабжения и накладывает ограничения на размеры движения поездов.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности работы систем тягового электроснабжения является внедрение систем накопления электроэнергии (СНЭ), обеспечивающих прием избыточной энергии рекуперативного торможения и последующее использование накопленной энергии для тяги поездов. В качестве такого решения предлагается создание автоматизированной системы расчета допустимых межпоездных интервалов движения поездов по условиям электроснабжения участка Белореченская – Туапсе с учетом применения систем накопления электроэнергии.

Актуальность внедрения систем накопления энергии на сегодняшний день обусловлена концепцией устойчивого развития железнодорожного транспорта, которая предполагает максимально эффективное использование энергетических ресурсов. Согласно стратегии научно-технологического развития холдинга ОАО «РЖД», среди ключевых направлений развития выделяют повышение энергетической эффективности, снижение углеродного следа, внедрение технологий низкоуглеродной энергетики, сокращение негативного воздействия транспортной системы на окружающую среду.

Одним из наиболее значимых источников повышения энергоэффективности является использование энергии рекуперативного торможения. При использовании рекуперации тяговые электродвигатели локомотива или электропоезда переходят в генераторный режим и возвращают электроэнергию в контактную сеть. Однако фактическое использование этой энергии возможно только при наличии в данный момент других потребителей на междоустанционной зоне, что не всегда удается достичь. На практике значительная часть рекуперативной энергии остается невостребованной и утилизируется в виде тепла. По данным исследований российских и зарубежных ученых, доля неиспользуемой энергии рекуперации может достигать половины от общего объема генерируемой энергии торможения.

Использование систем накопления энергии (СНЭ) позволяет аккумулировать избыточную энергию рекуперации и впоследствии возвращать ее в тяговую сеть в периоды повышенного энергопотребления.

Участок Белореченская – Туапсе является одним из наиболее сложных по условиям эксплуатации участков железных дорог России. Его особенностями являются наличие затяжных подъемов и спусков, значительные колебания поездной нагрузки, высокая доля грузового движения, ограниченная пропускная способность отдельных перегонов.

Как указывалось, ранее во время движения по затяжным спускам электроподвижной состав генерирует значительные объемы рекуперативной энергии, при этом на горных участках железных дорог объем энергии рекуперации может



Рис.1

составлять до 15–25 % общего расхода электроэнергии на тягу. Следовательно, рассматриваемый участок обладает значительным потенциалом для применения систем накопления энергии.

Одним из факторов, ограничивающих пропускную способность железнодорожных линий, является пропускная способность системы тягового электроснабжения. При сгущении движения поездов возникают значительные токовые нагрузки, вызывающие повышенные потери напряжения, что в свою очередь создает ограничения по допустимым токам оборудования и приводит к снижению напряжения на токоприемниках. В ряде случаев минимально допустимый межпоездной интервал определяется не условиями безопасности движения, а именно возможностями системы электроснабжения. Объясняется это тем, что при недостаточном уровне напряжения ухудшаются тяговые характеристики локомотивов, снижается сила тяги, увеличивается время разгона.

Автоматизированная система расчета межпоездных интервалов представляет собой цифровой комплекс поддержки принятия решений, выполняющий непрерывный мониторинг режима работы участка. В состав системы входят:

- подсистема сбора данных;
- цифровая модель тяговой сети;
- система мониторинга поездной обстановки;
- система контроля состояния накопителей энергии;
- модуль прогнозирования режимов;
- модуль расчета допустимых межпоездных интервалов.

Источниками информации системы расчета межпоездных интервалов являются:

- устройства телемеханики тяговых подстанций;
- системы микропроцессорного учета электроэнергии;
- локомотивные системы диагностики;
- автоматизированные системы управления движением поездов.

На основе поступающих данных формируется цифровой двойник участка, после чего в режиме реального времени выполняется моделирование электрических режимов тяговой сети. В результате проводимого анализа автоматизированная система выполняет расчет допустимого интервала на основе следующих параметров: положения поездов, массы поездов, профиля пути, состояния тяговой сети, режима работы тяговых подстанций, запаса энергии в накопителях и прогнозируемого потребления мощности. Для каждого прогнозируемого сценария движения вычисляются напряжения в узлах контактной сети, токи фидеров, потери мощности, остаточная емкость накопителей. После этого определяется минимальный интервал движения, при котором выполняются ограничения по напряжению на токоприемнике, по нагреву оборудования, допустимым токам контактной сети, режимам работы подстанций.

Применение методов машинного обучения позволяет дополнительно повысить точность прогнозирования нагрузок. Исследования, опубликованные в журналах *Applied Energy* и *Electric Power Systems Research*, показывают, что использование нейросетевых моделей позволяет повысить точность прогнозирования тяговых нагрузок на 10–20 % по сравнению с традиционными методами.

Одним из важнейших преимуществ внедрения СНЭ является снижение негативного воздействия на окружающую среду. Основные экологические эффекты включают сокращение потребления электроэнергии, снижение выбросов парниковых газов, уменьшение тепловых потерь, снижение нагрузки на энергосистему. Особенно важен тот факт, что при использовании энергии рекуперации исключается работа балластных сопротивлений при рекуперативном торможении. В традиционной схеме избыточная энергия преобразуется в тепло и безвозвратно теряется, а при использовании накопителей эта энергия сохраняется и повторно используется для тяги поездов.

По данным международных исследований, применение систем накопления энергии на железнодорожном транспорте позволяет сократить потребление энергии на 10–30 %. Экономический эффект от внедрения автоматизированной системы расчета межпоездных интервалов с использованием СНЭ формируется за счет нескольких составляющих.

Первая составляющая связана с возвратом энергии рекуперации. Вторая составляющая обусловлена повышением пропускной способности участка. Третья составляющая связана с уменьшением количества задержек поездов. Четвертая составляющая заключается в снижении потребности в капитальных вложениях на развитие инфраструктуры.

Для грузонапряженного участка Белореченская – Туапсе экономический эффект может быть существенно выше вследствие значительного объема рекуперативной энергии и высокой стоимости задержек поездов.

Дальнейшее развитие рассматриваемой технологии связано с формированием интеллектуальных энергетических систем железнодорожного транспорта. Перспективными направлениями являются создание цифровых двойников тяговых сетей, применение искусственного интеллекта для управления накопителями, интеграция накопителей с возобновляемыми источниками энергии, использование распределенных накопителей вдоль линии, внедрение технологий предиктивного управления энергопотоками.

Таким образом, рассматриваемый проект соответствует современным мировым тенденциям развития интеллектуальных энергетических систем железнодорожного транспорта и способен обеспечить значительный технологический, экономический и экологический эффект для Северо-Кавказской железной дороги и холдинга ОАО «РЖД» в целом.

Список литературы

1. Цифровая железная дорога и управление тяговым электроснабжением / Н. А. Попова, В. К. Чирков, А. В. Бутенко, Р. К. Свиридов // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: Сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2024 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 86–90.
2. **Логунова, П. А.** Применение метода восстановления поездной ситуации для определения потерь энергии на однопутном участке постоянного тока при наличии двухпутных вставок / П. А. Логунова, В. А. Осипов // Транспорт: наука, образование, производство : Материалы Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 24–26 апреля 2024 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 103–106.
3. **Бодров, П. А.** Предиктивный анализ состояния объектов как новая стратегия технической эксплуатации электрифицированных железных дорог /

References

1. Digital Railway and Traction Power Supply Management / N. A. Popova, V. K. Chirkov, A. V. Butenko, R. K. Sviridov // Transport Power Engineering. Current Problems and Tasks: Collection of Scientific Papers of the VIII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, March 1–2, 2024. – Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2024. – Pp. 86–90.
2. **Logunova, P. A.** Application of the Train Situation Reconstruction Method to Determine Energy Losses on a Single-Track DC Section in the Presence of Double-Track Inserts / P. A. Logunova, V. A. Osipov // Transport : Science, Education, Production : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 24–26, 2024. – Rostov-on-Don : Rostov State University of Railway Engineering, 2024. – P. 103–106.
3. **Bodrov, P. A.** Predictive analysis of the state of objects as a new strategy for the technical operation of electrified railways / P. A. Bodrov, N. A. Popova // Engineering

П. А. Бодров, Н. А. Попова // Инженерный
вестник Дона. – 2021. – № 8 (80). – С. 231–240.

Bulletin of the Don. – 2021. – No. 8 (80). –
P. 231–240.

A. V. Chernomazov

**AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING PERMISSIBLE INTERTRAIN SPACES
ON THE ELECTRICIFIED BELORECHENSKAYA–TUAPSE SECTION BASED
ON THE USE OF ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS**

Abstract. This article examines the concept of an automated system for calculating permissible intertrain spacing on the Belorechenskaya – Tuapse electrified section of the North Caucasus Railway using energy storage systems. It is shown that one of the factors limiting the capacity of railway lines is the operating modes of the traction power supply system, especially on sections with complex track profiles and high train traffic volumes. The relevance of using energy storage systems to capture excess energy from regenerative braking and subsequently use it for train traction is substantiated. This paper examines the specific features of the Belorechenskaya–Tuapse section, which is characterized by significant volumes of regenerative energy due to long descents and climbs. The paper presents the structure of an automated system, including a digital model of the traction network, subsystems for monitoring train conditions and energy storage device status, as well as modules for forecasting and calculating permissible intertrain intervals. It is demonstrated that the use of a digital twin of the section and machine learning methods improves the accuracy of forecasting traction power supply system operating modes. The energy, economic, and environmental benefits of the proposed solution are highlighted, including increased line capacity, reduced train delays, reduced electricity consumption, a reduced carbon footprint, and improved regenerative energy efficiency.

Keywords: capacity, train interval, energy storage devices.

For citation: Chernomazov, A. V. Automated system for calculating permissible intertrain spaces on the electrified Belorechenskaya–Tuapse section based on the use of electricity storage systems / A. V. Chernomazov // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 197–201. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_197.

Сведения об авторах

Черномазов Александр Владимирович
главный инженер Северо-Кавказской
железной дороги (филиала ОАО «РЖД»),
тел. 8 (863) 259-44-04,
e-mail: skzd.rzd.ru

Information about the authors

Chernomazov Alexander Vladimirovich
Chief Engineer of the North Caucasus
Railway (a branch of Russian Railways),
Tel. 8 (863) 259-44-04,
e-mail: skzd.rzd.ru