

*М. А. Гаранин, С. А. Блинкова*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

**Аннотация.** Приведены результаты исследования, посвящённого оценке актуальности и перспективности применения накопителей энергии в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог. Авторами предложена схема подключения накопителя энергии к контактной сети и алгоритм его работы. По результатам моделирования в специализированном программном комплексе приведена предварительная оценка актуальности и перспектив использования накопителей энергии для системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта. На участках, где возможна рекуперация, авторами проведена оценка энергетического потенциала и степени его использования при существующем оборудовании на тяговых подстанциях и размерах движения. Кроме этого, выполнен анализ рынка накопителей энергии для применения в системе тягового электроснабжения железных дорог.

**Ключевые слова:** железная дорога, железнодорожный транспорт, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, накопитель энергии, технические требования, моделирование.

**Для цитирования:** Гаранин, М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_85.

### *Введение*

На железных дорогах постоянного тока для обеспечения возможности приема и использования рекуперированной электровозом энергии тяговые подстанции железнодорожного транспорта должны быть оборудованы инверторами, либо на перегоне с рекуперированным электровозом должен находиться электровоз в режиме тяги.

Для повышения эффективности системы тягового электроснабжения на тяговых подстанциях и постах секционирования железнодорожного транспорта применяются вольдобавочные устройства [1, 2]. Эти устройства имеют значительную установочную мощность, но эффективность их применения мала ввиду того, что они получают питание от той же сети внешнего электроснабжения, что и тяговые подстанции, при этом внешняя сеть часто не обладает достаточным запасом мощности.

Для повышения эффективности использования энергии рекуперации предлагается применять накопители энергии. В этом случае не потребуются увеличение мощности тяговых подстанций и внешней системы электроснабжения. Система накопителей, принимая энергию рекуперированных электровозов, при отсутствии необходимости применения полученной мощности накапливает её, а отдаёт в тяговую сеть в момент, когда мощность будет востребована.

Такие решения на уровне идей и общих схемных решений прорабатывались и неоднократно публиковались, но до практической реализации именно для систем тягового электроснабжения не доводились.

В настоящее время накопители энергии являются одним из триггеров развития современной электроэнергетики [3–7]. В России уже формируется национальный рынок и складывается практика успешного применения накопителей в энергетике и на транспорте.

### *Моделирование системы тягового электроснабжения с применением накопителей энергии*

При проектировании накопительной системы необходимо решить ряд задач, а именно, определить величину электрической емкости накопителя, который должен обеспечить прием электрической энергии, вырабатываемой в процессе рекуперативного торможения. Количество энергии, которое теоретически может быть возвращено в процессе торможения, рассчитывается по известному выражению. Количество энергии, возвращаемой в процессе торможения, определяется величиной скорости начала торможения.

В общем случае накапливаемая за время рекуперации электрическая энергия определяется по выражению:

$$A_{рек} = U \cdot I \cdot t = U_{\max} \cdot I_{рек} \cdot t_{\text{торм}}$$

где  $U_{\max}$  – напряжение в период рекуперации;

$I_{рек}$  – ток рекуперации;

$t_{\text{торм}}$  – время торможения с замедлением  $t_{\text{торм}} = (v_{\text{торм}} - v_{\text{мех}}) / a_{\text{торм}}$ .

Рассчитанная таким образом емкость одного элемента накопителя и их количество будут соответствовать назначению при условии равенства допустимого тока зарядки системы накопителей току рекуперации. Однако на практике это невыполнимо, поскольку номинальный ток заряда, при котором накопитель сохраняет свою работоспособность, при сохранении определенного количества циклов заряд-разряд определяется величиной 10–20 % от величины емкости аккумулятора.

Второй задачей, которую необходимо решать при использовании накопительных систем на железнодорожном транспорте, – определение места установки накопительной системы с учётом возможностей существующей системы электроснабжения и положительного эффекта от их применения. В специализированном программном комплексе был выполнен расчёт и моделирование, которые позволяют наглядно увидеть и определить узкие места конкретного участка (рис. 1).

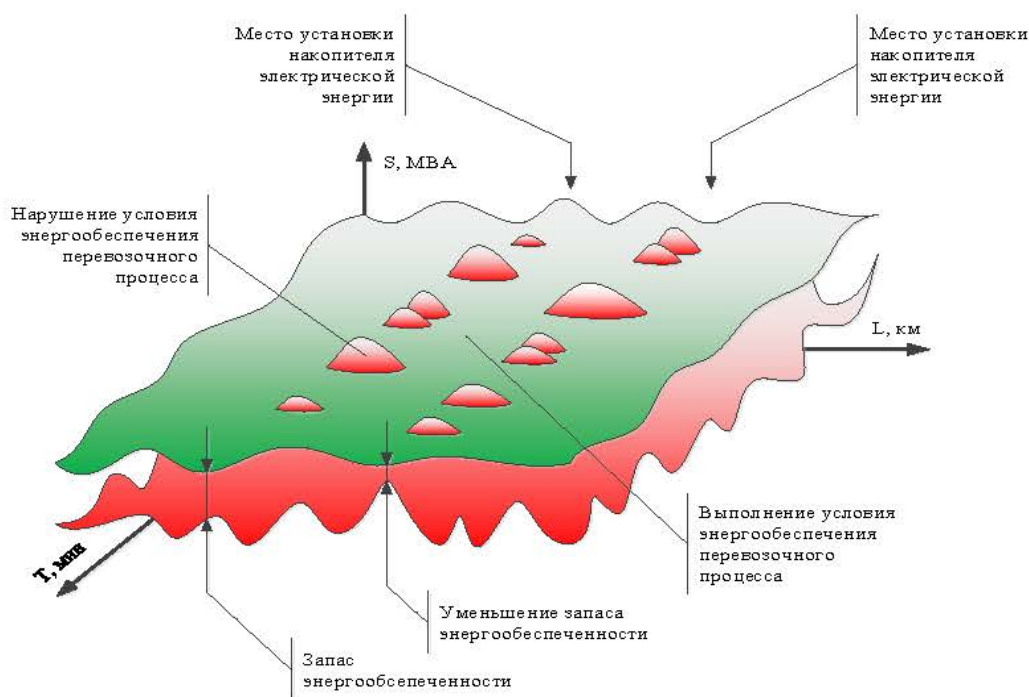


Рис. 1. Результаты расчёта и моделирования энергообеспеченности участка

Моделирование позволяет представить результаты расчёта в виде поверхностей. Верхняя поверхность графика образована возможностью системы тягового электроснабжения обеспечить энергией электроподвижной состав. Эта поверхность показывает возможности системы электроснабжения в энергообеспечении перевозочного процесса в конкретный момент времени, в конкретной точке участка железнодорожной линии. Нижняя поверхность образована потребностью электроподвижного состава и обусловлена массой поезда и профилем пути. Разность между двумя поверхностями образует запас энергообеспеченности системы электроснабжения на заданном участке. Его положительное значение означает штатный режим работы системы, отрицательное значение – нарушение условий энергообеспечения. В таких местах и должны устанавливаться накопительные системы.

В рамках исследований необходимо провести анализ участков, где возможна рекуперация, провести оценку энергетического потенциала и степени его использования при существующем оборудовании на тяговых подстанциях и размерах движения.

Тяговые расчеты и моделирование могут выполняться с применением специализированного программного комплекса с использованием общеизвестных формул и выражений. Исходными данными являются:

- 1) профиль участка (рис. 2);
- 2) график движения – случайный, соответствующий среднесуточным размерам движения по этому участку (рис. 3);
- 3) максимальная масса поездов;
- 4) минимальный межпоездной интервал;
- 5) период моделирования (с отдельным расчетом по мгновенным схемам).

Поскольку специализированный программный комплекс не способен моделировать работу накопителя, то все расчеты выполнялись с имитацией накопителя энергии в виде тяговой подстанции с инвертором, установленном в наиболее выгодном месте участка. Для каждой мгновенной схемы задавался уровень напряжения на накопителе, соответствующий режиму его работы.



Рис. 2. Пример профиля пути моделируемого участка

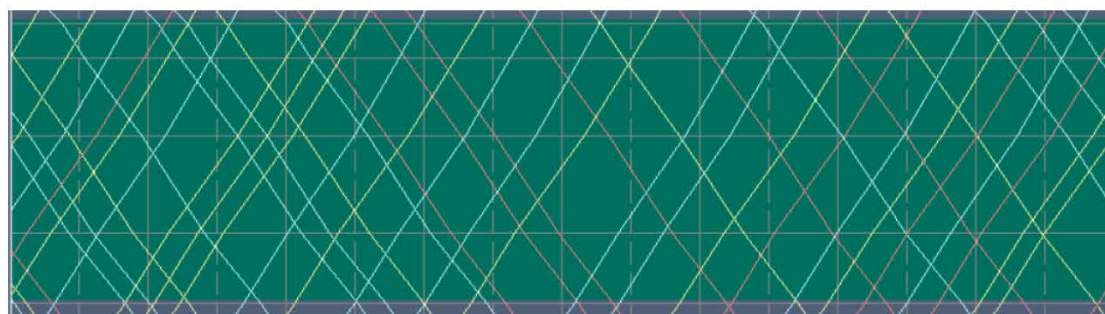


Рис. 3. Пример графика движения, соответствующий среднесуточным размерам движения по участку

Результаты расчетов и моделирования на каждом из рассматриваемых участков показали, что без использования накопительной системы расход электроэнергии может быть снижен в среднем на 4–4,5 %, а ключевой показатель – минимальный уровень напряжения на токоприемнике можно поддерживать в нормируемых пределах.

Такие результаты подтверждаются расчётами и моделированием на конкретном участке, который может быть принят как «характерный» или «типовой». Профиль «типового» участка соответствует рельефу и среднему перепаду высот профиля пути железной дороги в европейской части России. График движения – случайный, соответствующий среднесуточным размерам движения, максимальная масса поездов, минимальный межпоездной интервал также являются усреднёнными.

На примере «типового» участка и других усреднённых параметров получены следующие результаты:

а) без применения накопительной системы на тяговых подстанциях и постах секционирования расход электроэнергии составил – 301 097 кВт·ч, при этом минимальный уровень напряжения на токоприемнике – 2565 В (рис. 4, 5);

б) с применением накопительной системы на тяговых подстанциях и постах секционирования расход электроэнергии составил – 288 232 кВт·ч, при этом минимальный уровень напряжения на токоприемнике – 2637 В (см. рис. 4, 5).

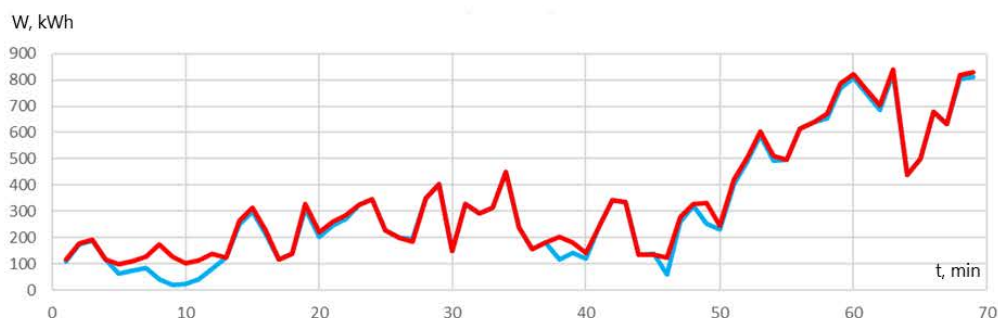


Рис. 4. График изменения расхода электроэнергии на тягу по заданному участку

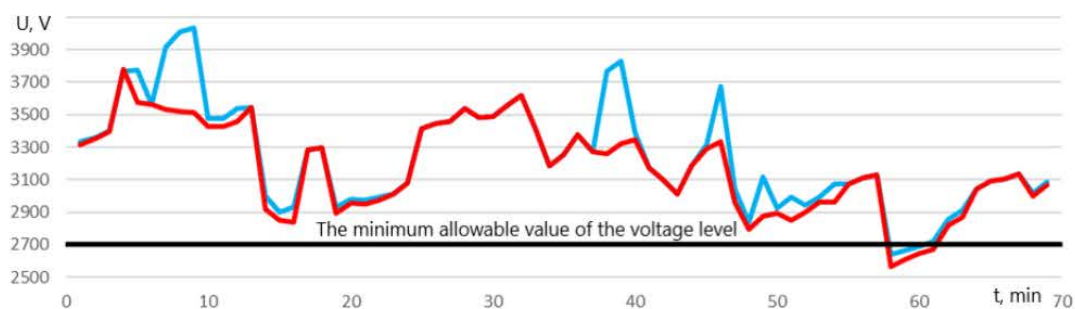


Рис. 5. График изменения уровня напряжения в контактной сети на заданном участке

В результате снижение расхода электроэнергии на тягу поездов по «типовому» участку составит 4,27 %. Экстраполируя полученные результаты на годовой объем электроэнергии, расходуемый на тягу по «типовому» участку, определим, что экономия электроэнергии составит 3 789 652 кВт·ч.

В связи с большим количеством участков электрифицированных железных дорог, имеющих сложный профиль пути, и, как следствие, высокий потенциал рекуперации электроэнергии, общая потребность в накопительных системах для транспорта весьма значительна. Предлагаемый подход учитывает перспективы развития транспортной инфраструктуры и предполагает высокую вероятность инвестирования средств в накопительные системы, позволяющие устранить узкие места, в том числе в части усиления системы тягового электроснабжения, особенно для пропуска поездов большой массы.

Предварительные исследования показали, что для электрифицированных железных дорог требуются накопители энергии с определенными характеристиками: их электрическая ёмкость должна быть не менее 300 кВт·ч, число циклов заряда/разряда не менее 100 000 раз, а мощность принимаемой и отдаваемой энергии не менее 1 МВт.

#### *Заключение*

Важным направлением в сфере электроснабжения железных дорог является разработка автоматизированных, а в большинстве случаев автоматических систем управления накопительными системами. Автоматическая система управления накопительной системой для железнодорожного транспорта будет отличаться от уже существующих систем управления. Такая система должна быть адаптирована под режимы работы оборудования в системе тягового электроснабжения и эффективно взаимодействовать с ним. Для обеспечения высокой точности входных параметров необходима автоматизированная система на базе ЭВМ и существующих систем контроля и управления, которая позволила бы расширить функциональные возможности системы управления тяговыми подстанциями железнодорожного транспорта и за счёт обработки множества взаимосвязанных параметров и управления накопительной системой повысить эффективность. Несмотря на все достоинства существующих систем управления накопительными системами, отсутствуют системы, адаптированные под особенности эксплуатации системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта.

Эффект от использования накопителей энергии на каком-либо участке может быть предварительно оценен по результатам научного исследования, но фактическое значение может быть получено только по результатам натурных испытаний опытного образца, поскольку эффект во многом зависит от фактического исполнения графика движения поездов.

## Список литературы

- 1 Гаранин, М. А. Оценка рисков при переводе системы тягового электроснабжения с постоянного на переменный ток / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 1(73). – С. 13–17. – ISSN 1997-0722.
- 2 Добрынин, Е. В. Управление объектами системы тягового электроснабжения в концепции цифровой железной дороги / Е. В. Добрынин, И. А. Ефремова // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 237–240. – EDN YZAGQP.
- 3 Блинкова, С. А. Актуальность использования накопителей энергии для системы тягового электроснабжения / С. А. Блинкова, Е. В. Добрынин, О. Н. Козменков // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 3(93). – С. 11–15. – EDN RVAYTV.
- 4 Blinkova, S. Development of an Energy System at a Railway Station Using a Gas Turbine Power Station / S. Blinkova, M. Garanin, E. Dobrynin // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 538–543. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.105.
- 5 Добрынин, Е. В. Оценка эффективности накопителя энергии в системе тягового электроснабжения / Е. В. Добрынин, Т. М. Шигапов, Н. Н. Федотов // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – С. 324–326. – EDN TQJJVE.
- 6 Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицина, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. 2020. – № 9. – С. 26–31. – ISSN 0013-5860.
- 7 Шевлюгин, М. В. О применении накопителей электрической энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы / М. В. Шевлюгин, А. Н. Стадников, А. С. Юдин // Электротехника. – 2020. – № 1. – С. 7–31. – ISSN 0013-5860.

## References

- 1 Garanin, M. A. Risk assessment when transferring the traction power supply system from direct to alternating current / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Vestnik transporta Povolzhya – 2019. – No. 1(73). – P. 13–17. – ISSN 1997-0722.
- 2 Dobrynin, E. V. Management of objects of the traction power supply system in the concept of the digital railway / E. V. Dobrynin, I. A. Efremova // Science and education for transport. – 2018. – No. 1. – P. 237–240. – EDN YZAGQP.
- 3 Blinkova, S. A. The relevance of using energy storage devices for the traction power supply system / S. A. Blinkova, E. V. Dobrynin, O. N. Kozmenkov // Vestnik transporta Povolzhya. – 2022. – No. 3(93). – P. 11–15. – EDN RVAYTV.
- 4 Blinkova, S. Development of an Energy System at a Railway Station Using a Gas Turbine Power Station / S. Blinkova, M. Garanin, E. Dobrynin // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 may, 2020. – Novosibirsk, 2021. – P. 538–543. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.105.
- 5 Dobrynin, E. V. Evaluation of the energy storage efficiency in the traction power supply system / E. V. Dobrynin, T. M. Shigapov, N. N. Fedotov // Science and education for transport. – 2020. – No. 1. – P. 324–326. – EDN TQJJVE.
- 6 Improving the reliability of power supply for own needs of metro traction substations with the help of energy storage devices / M. V. Shevlyugin, A. E. Golitsina, M. N. Belov, D. S. Pletnev // Electrical engineering. 2020. – No. 9. – P. 26–31. – ISSN 0013-5860.
- 7 Shevlyugin, M. V. On the use of electric energy storage devices in the power supply system of a metropolis on the example of Moscow / M. V. Shevlyugin, A. N. Stadnikov, A. S. Yudin // Electrical engineering. – 2020. – No. 1. – P. 7–31. – ISSN 0013-5860.

*M. A. Garanin, S. A. Blinkova*

## THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM MODELING USING THE ENERGY STORAGE

**Abstract.** The paper describes the results of the study devoted to assessing the relevance and prospects of using energy storage devices in the traction power supply system of the electrified railways. The authors proposed a scheme for connecting an energy storage device to a contact network and an algorithm for its operation. Based on the results of modeling in a specialized software package, a preliminary assessment of the relevance and prospects for the use of energy storage devices for the traction power supply system of the railway transport is given. In areas where recuperation is possible, the authors assessed the energy potential and the degree of its use with existing equipment at traction substations and the size of traffic. In addition, an analysis of the energy storage market for use in the traction power supply system of railways was carried out.

**Keywords:** railway, railway transport, traction power supply system, energy recovery, energy storage, technical requirements, modeling.

**For citation:** Garanin, M. A. The traction power supply system modeling using the energy storage / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_85.

#### Сведения об авторах

**Гаранин Максим Алексеевич**  
Самарский государственный университет  
путей сообщения (СамГУПС),  
доктор экономических наук, доцент, ректор,  
e-mail: garanin@samgups.ru

**Блиноква Светлана Александровна**  
Самарский государственный университет  
путей сообщения (СамГУПС),  
кандидат технических наук, доцент,  
декан электротехнического факультета,  
e-mail: blinkova@samgups.ru

#### Information about the authors

**Garanin Maksim Alekseevich**  
Samara State Transport University (SSTU),  
Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Rector of SSTU,  
e-mail: garanin@samgups.ru

**Blinkova Svetlana Aleksandrovna**  
Samara State Transport University (SSTU),  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
Dean of the Electrical Engineering Faculty,  
e-mail: blinkova@samgups.ru