

научно-технический

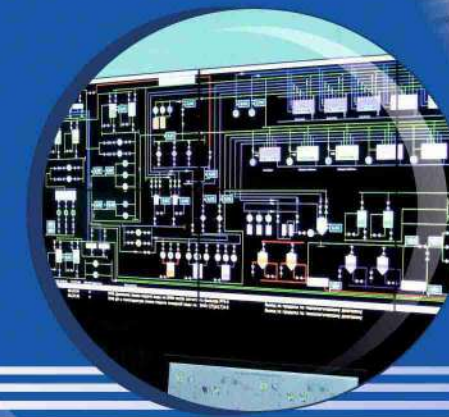
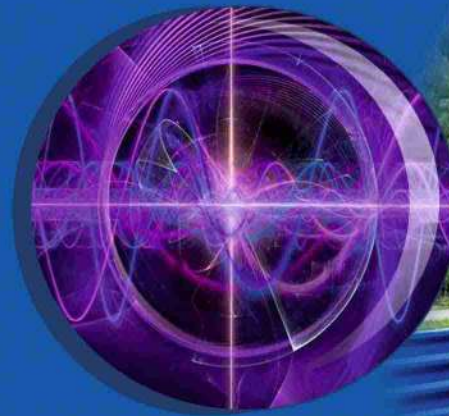
ISSN 2220-4245  
журнал

# ИЗВЕСТИЯ

№ 1(57)

2024

# Транссиба





## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, советник при ректорате ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. **Алексеев Виктор Михайлович** – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТа (МИИТа), д.т.н., профессор (Москва).
5. **Бессоленко Сергей Анатольевич** – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Гуда Александр Николаевич** – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Исаков Александр Леонидович** – зав. кафедрой «Изъяснения, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ИГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. **Косарев Александр Борисович** – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. **Кузнецов Андрей Альбертович** – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. **Лебедев Виталий Матвеевич** – д.т.н., профессор (Омск).
17. **Никитин Александр Борисович** – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ИГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. **Сидоров Олег Алексеевич** – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. **Смердин Александр Николаевич** – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛПТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТРУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. **Харламов Виктор Васильевич** – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

## EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiyev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Alekseev Viktor Mikhailovich** – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. **Bessonenko Sergey Anatolevich** – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. **Vedruchenko Victor Rodionovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. **Goryunov Vladimir Nikolaevich** – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. **Huda Alexander Nikolaevich** – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. **Zykina Anna Vladimirovna** – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer sciences» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. **Isakov Alexander Leonidovich** – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. **Kim Konstantin Konstantinovich** – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. **Komyakov Aleksandr Anatolevich** – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. **Kosarev Alexander Borisovich** – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. **Kuznetsov Andrey Albertovich** – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. **Lebedev Vitaliy Matveyevich** – D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. **Nikitin Aleksandr Borisovich** – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. **Livshits Alexandr Valerievich** – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. **Paramonov Alexandr Mikhailovich** – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. **Sidorov Oleg Alexeevich** – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. **Smerdin Alexandr Nikolaevich** – the first vice-rector, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Rolling stock» of AILT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Ковалев А. А., Глазов Д. В. Совершенствование конструкции и методов монтажа фиксирующих устройств контактной сети при высокоскоростном движении на этапе проектирования..... 2
- Сидоров О. А., Михайлов М. С. Исследование токоприемников электроподвижного состава, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами в кюветках..... 10
- Косяков А. А., Кочунов Ю. А. Определение разрядных характеристик полимерных композитных кронштейнов воздушных линий 6–10 кВ устройств автоматизации и продольного электроснабжения железных дорог..... 22
- Незевая В. Л. Моделирование процессов регулирования напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного тока с помощью устройств накопления электроэнергии..... 32
- Хаджимухамедова М. А., Сатторов С. Б., Саидивалиев Ш. У., Бозоров Р. Ш. Исследование воздействия встречного ветра на полувагон при роспуске с горба горки..... 44

### Управление процессами перевозок

- Осипов А. П., Медведев Д. А. Виртуальная сцепка. Подходы и реализация..... 53
- Пищик В. Г. Применение технологии стеллажного хранения при зонном секционировании контейнерного терминала..... 64
- Лунев С. А., Гришечко С. В., Ключников М. В. Повышение эффективности работы устройств автоматической переездной сигнализации..... 73

### Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Смелянский И. В., Третьяков В. В., Коньшклов А. Н. Возможность повышения скорости пропуска поездов при использовании упругих подпальных прокладок в стыках..... 85

### Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

- Мухамедова З. Г., Бобоев Д. Ш., Якулбаев Х. М. Корреляционный анализ факторов, влияющих на контрейлерные перевозки в Узбекистане..... 94
- Петренева Е. А. Контрейлерные перевозки как метод логистического подхода..... 105

### Энергетические системы и комплексы

- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Экспериментальное определение объемов оплачиваемых потерь электроэнергии в контактной сети городского электротранспорта с рекуперацией..... 116

### Электротехника

- Закарюкин В. П., Крюков А. В., Воронина Е. В. Моделирование электромагнитных полей тяговой сети 25 кВ с учетом металлических конструкций порталного типа..... 131

### Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Худяков П. Ю., Кисельников А. Ю., Старцев И. М. Разработка программно-аппаратного комплекса измерения токов электродов для стационарной системы мониторинга основных параметров работы электролизных ванн..... 141
- Лакин И. И. Управление рисками наступления отказов тягового подвижного состава с использованием методов теории нечетких множеств..... 149

Научно-технический журнал «Известия Транссиб» / Journal of Transsib Railway Studies»

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

А. В. Кацай<sup>1</sup>, М. В. Шевлюгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Кинемак», г. Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ОПЛАЧИВАЕМЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

**Аннотация.** В исследовании рассмотрены составляющие потерь энергии в системе энергоснабжения работы городского электротранспорта – на тяговых подстанциях и в контактно-кабельной сети. Поскольку указанные потери энергии влияют на финансовые затраты предприятия городского электротранспорта при потреблении оплачиваемой электроэнергии из высоковольтной линии, то важной задачей по повышению энергоэффективности является замещение этой энергии на бесплатную энергию рекуперации. Выведены методики и формулы определения объемов потерь в контактно-кабельной сети и на тяговых подстанциях для стационарной и подвижной нагрузки с использованием имеющихся у предприятий электротранспорта средств учета на фидерных кабелях и на подвижном составе. Установлено, что доля потерь при передаче энергии на полезную сетевую нагрузку от высоковольтного источника всегда выше, чем при питании ее от рекуперационных вагонов, на величину, обратно пропорциональную КПД тяговой подстанции в силу того, что она не участвует в обороте энергии рекуперации в городском электротранспорте. Полученные значения КПД применяются для анализа потерь энергии, формирования прогнозов энергопотребления, а также участвуют в обосновании формирования мероприятий для снижения финансовых затрат предприятия на оплату электроэнергии в системе электропитания транспортной работы. Повышение объемов повторно используемой энергии рекуперации для замены ею энергии из высоковольтных линий возможно только за счет вовлечения в полезную работу избыточной рекуперации, которая сейчас рассеивается на тормозных резисторах и вторично не используется. Поскольку потери энергии в контактной сети в пять – шесть раз ниже, чем в накопителях с любым типом накопительных элементов, то единственным способом рентабельного вовлечения избыточной рекуперации в полезную транспортную работу является сохранение имеющихся межпоездных перетоков рекуперации по контактной сети, а также дополнение этих перетоков перенаправленной избыточной рекуперацией посредством использования накопителей. Так как накопители бортового исполнения делают невозможными перетоки рекуперации по контактной сети, то их применение приводит к пятикратному росту потерь рекуперации. Работа стационарных накопителей сохраняет все имеющиеся межпоездные перетоки полезной рекуперации, а также добавляет новые каналы полезной утилизации избыточной рекуперации в ходе зарядки и выдает на нагрузку запасенную в накопительный элемент часть перенаправленной избыточной рекуперации.

**Ключевые слова:** потери энергии, рекуперативное торможение, полезная и избыточная рекуперация, накопители энергии, контактная сеть, тяговая подстанция, подвижной состав, стационарная нагрузка, перенаправление избыточной рекуперации.

Alexander V. Katsay<sup>1</sup>, Maxim V. Shevlyugin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kinemak LLC, Moscow, the Russian Federation;

<sup>2</sup>Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE VOLUME OF PAID ELECTRICITY LOSSES IN THE CONTACT NETWORK OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT WITH RECOVERY

**Abstract.** The study examines the components of energy losses in the power supply system of urban electric transport – at traction substations and in the contact-cable network. Since these energy losses affect the financial costs of the city electric transport enterprise when consuming paid electricity from a high-voltage line, an important task to improve energy efficiency is to replace this energy with free energy recovery. Methods and formulas for determining the volume of losses in the contact-cable network and at traction substations for stationary and mobile loads are derived using the means of accounting available to electric transport enterprises on feeder cables and on rolling stock. It is established that the share of losses in the transmission of energy to the utility network load from a high-voltage source is always higher than when it is powered from recuperating wagons, by an amount inversely proportional to the efficiency of the traction substation due to the fact that it does not participate in the turnover of energy recovery in urban electric transport. The obtained

*efficiency values are used to analyze energy losses, generate forecasts of energy consumption, and also participate in the justification of the formation of measures to reduce the financial costs of the enterprise to pay for electricity in the power supply system of transport work. Increasing the volume of reused recovery energy to replace it with energy from high-voltage lines is possible only by involving excess recovery in useful work, which is now dissipated on brake resistors and is not used again. Since energy losses in the contact network are 5 – 6 times lower than in storage devices with any type of storage elements, the only way to cost-effectively involve excess recovery in useful transport work is to preserve the existing inter-train recuperation flows through the contact network, as well as supplement these flows with redirected excess recovery through the use of storage devices. Because onboard storage devices make it impossible recuperation flows through the contact network, then their use leads to a fivefold increase in recovery losses. The operation of stationary storage devices preserves all available inter-train flows of useful recovery, and also adds new channels for the useful utilization of excess recovery during charging and, in addition, when a part of the redirected excess recovery stored in the storage element is issued to the load.*

**Keywords:** energy losses, regenerative braking, recuperative energy flows, useful and excessive recovery, stationary storage, contact network, traction substation, rolling stock, stationary load, redirection of excess recovery.

Потери энергии в системе тягового энергоснабжения (СТЭ) оказывают заметное влияние на общее энергопотребление предприятия горэлектротранспорта (ГЭТа) и, как следствие, на экономическую эффективность транспортной работы в целом. В современных электротранспортных системах на подвижном составе (трамваях и троллейбусах) широко используются частотные преобразователи, позволяющие сокращать потребление энергии за счет снижения пусковых токов тяговых электродвигателей, а также возвращать на полезную работу часть затраченной на тягу энергии при рекуперативном торможении. В ходе торможения подвижного состава (ПС) с выдачей рекуперативной энергии в контактно-кабельную сеть (ККС) последняя не имеет закупочной стоимости в отличие от потребления энергии от тяговых подстанций (ТП), для питания которых энергия поставляется энергоснабжающей организацией по коммерческим ценам. Соответственно бесплатный энергоисточник в виде рекуперированного ПС замещает и потери оплачиваемой энергии в ККС и на ТП. Объем потребленной оплачиваемой энергии фиксируется входным счетчиком на стороне высоковольтного трехфазного напряжения тяговой подстанции (АСКУЭ), обычно на линии 6(10) кВ, которая является первичным источником электропитания в ГЭТе. С точки зрения комплексной эффективности заданного объема транспортной работы вопрос оптимизации энергопотребления в СТЭ сводится к минимизации стоимостных затрат на тягу и нетяговые нужды при движении ПС на линии [1].

Рекуперированная подвижным составом энергия потребляется полезной нагрузкой на выпрямленной низковольтной стороне ТП и с целью производственного учета может быть зафиксирована счетчиками постоянного тока, размещенными на клеммах токосъемников вагонов. Рекуперированные тяговые электродвигатели подвижного состава являются вторичными источниками энергии в системе энергоснабжения транспортной работы, поскольку выдают на нагрузку несколько раз преобразованную энергию, ранее потребленную тяговыми устройствами из контактной сети, в том числе получаемую от первичного и вторичных источников энергии. Выданная в контактную сеть полезная часть рекуперации замещает часть энергии от ТП для работы нагрузки, включая пропорциональную долю транспортных потерь в ней. Для правильного определения объемов замещения первичной энергии на бесплатную рекуперативную необходимо привести измеренные или рассчитанные показатели полезно использованной рекуперированной энергии, полученные на выпрямленной низковольтной стороне СТЭ, к показателям энергопотребления на высоковольтной трехфазной стороне тяговой подстанции, т. е. к первичному энергоисточнику. Такое приведение объемов снижения потребления оплачиваемой энергии на выпрямленной стороне (за счет повторного использования рекуперативной) к потребляемой платной энергии по трехфазной высоковольтной стороне позволяет корректно оценить экономию как в энергетическом балансе, так и в стоимостном [2, 3]. Прямое сравнение энергопотребления и генерации тягового привода по выпрямленной стороне с входной энергией в точке присоединения систем АСКУЭ некорректно, так как при этом выпадают потери энергии при ее преобразованиях на ТП и передаче по ККС.



В последнее время в городском электротранспорте исследуется применение накопителей энергии (НЭ) бортового и стационарного размещения, предназначенных для содействия более полному использованию рекуперированной энергии, поскольку без накопителей нереализованной остается избыточная часть рекуперации, которая хотя и выполняет полезную для поезда работу по поглощению выделяемой в ходе торможения энергии, но при этом данная энергия вторично работу в транспортной системе не производит, а рассеивается теплом в атмосферу на тормозных резисторах. Все накопители запасают избыточную часть рекуперации (а накопители бортового размещения забирают еще и полезную рекуперацию), которую выделяют при рекуперативном торможении вторичные энергоисточники – тяговые приводы, преобразуют и хранят ее и выделяют на нагрузку, т. е. являются третичными источниками в энергосистеме ГЭТа. Перенаправляющие бывшую ранее избыточной энергию рекуперации на полезную нагрузку накопители так же, как и тяговые приводы в генераторном режиме, являются собственным источником электропитания предприятия ГЭТа, участвуют в выполнении транспортной работы и тем самым дополнительно ко вторичным энергоисточникам в СТЭ замещают часть оплачиваемой энергии, получаемой от первичного источника. Помимо перенаправления избыточной рекуперированной энергии на полезную нагрузку при работе накопителей последними также расходуется энергия на собственные нужды (система управления, климат-контроль, дополнительные тяговые энергозатраты на перевозку бортовых НЭ). Эта энергия расходуется как от первичного источника, так и от вторичных и от третичных, т. е. накопители частично самопитают свои собственные нужды запасаемой и выдаваемой энергией рекуперации.

Определение экономической эффективности работы СТЭ требует приведения энергобаланса на выпрямленной стороне ТП, для формирования которого имеются несколько измеренных параметров в различных точках учета ККС, к единой точке учета на высоковольтной трехфазной стороне, в которой установлен прибор учета АСКУЭ. Условием для такого приведения помимо измеренных данных в перечисленных выше точках учета по выпрямленной стороне является наличие синхронных показателей эффективности передачи энергии по ККС и преобразования ее на ТП. Задачей данного исследования является выведение экспериментального способа определения транспортных потерь энергии на ТП и в ККС ГЭТа, в том числе потерь энергии рекуперации, и влияния последних на потребление энергии системой от оплачиваемого первичного источника согласно методике, выведенной авторами в работе [4].

**Потери энергии в системе тягового электроснабжения.** Указанная методика [4] учитывает в энергобалансе СТЭ за период не только выдаваемую в ККС всеми источниками энергию, но и объем потребления полезной нагрузкой (подвижным составом  $E_{ЭПС}$  и стационарной нагрузкой  $E_{стан}$ ) на своих входных клеммах, а также объемы потерь энергии при ее преобразованиях на ТП и при транспортировке в ККС ( $\Delta E_{ТП}$  и  $\Delta E_{ККС}$  соответственно). Без учета потерь энергии в процессах ее преобразований на тяговой подстанции общее уравнение полного энергобаланса за исследуемый период на выпрямленной стороне ТП (т. е. в ККС) принимает вид:

$$E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}} = E_{\text{ЭПС}} + E_{\text{стан}} + \Delta E_{\text{ККС}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{рек. полезн}}$  – выдаваемая в ККС на полезную нагрузку рекуперативная энергия,  $E_{\text{выпр. ТП}}$  – выдаваемая в ККС выпрямительным агрегатом ТП энергия;  $\Delta E_{\text{ККС}}$  складывается из  $\Delta E_{\text{стан}}$  – потерь энергии в ККС при питании стационарной нагрузки и  $\Delta E_{\text{ЭПС}}$  – потерь энергии в ККС при питании подвижного состава.

На рисунке 1 представлено схематическое изображение системы одностороннего электропитания секций ККС ГЭТа от тяговой подстанции. На высоковольтной стороне тяговой подстанции установлена система энергоснабжающей организации по контролю и

учету электроэнергии (АСКУЭ), которая фиксирует объем поставляемой энергопоставщиком оплачиваемой энергии по высоковольтному трехфазному напряжению (6 – 10 кВ). В СТЭ проводится также производственный учет энергии по выпрямленному напряжению 600 В, поступающей после выпрямительного агрегата на сборную шину, от которой питаются фидерные кабели изолированных секций контактной сети.

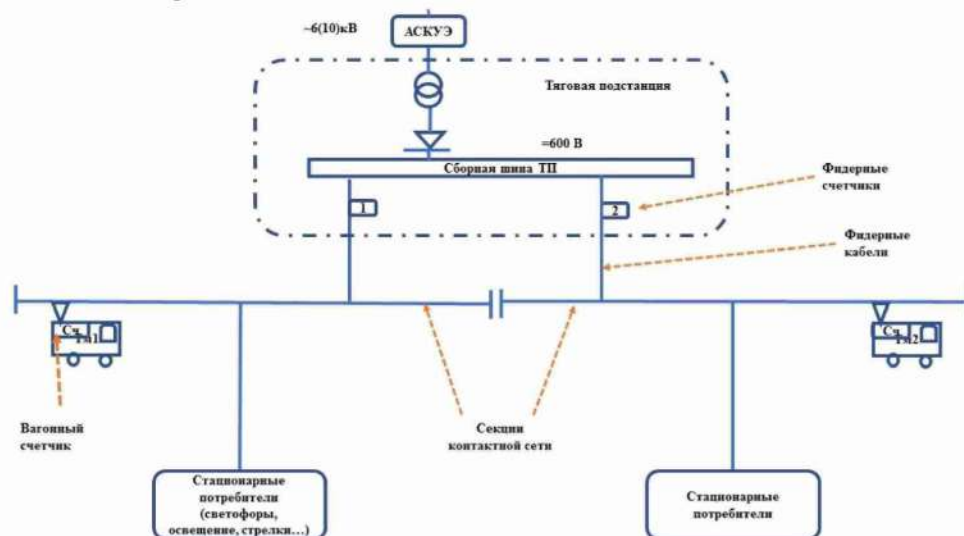


Рисунок 1 – Схема питания секций ККС от тяговой подстанции с точками измерения энергии

Обычно для учета выпрямленной энергии от ТП на каждый фидерный кабель устанавливается двунаправленный счетчик, который регистрирует как прямые токи питания своих кабелей ( $E_{\text{прям. фид}}$ ), так и обратные рекуперативные токи по цепи межфидерного перетока рекуперации ( $E_{\text{мф}}$ ). Внутрифидерные перетоки рекуперации ( $E_{\text{вф}}$ ) такими счетчиками не учитываются, так как эти потоки внутри секций не доходят до фидерных счетчиков [5], хотя и учитываются в суммарном показателе объемов энергии полезной рекуперации бортовыми счетчиками поездов. Здесь и далее под поездами мы имеем в виду подвижной состав ГЭТа – троллейбусы, трамваи, метropоезда, монорельс, в том числе работающие по системе многих единиц.

В состав штатной сетевой стационарной нагрузки могут входить автоматизированные переводы стрелок, обогреватели стрелок, системы отслеживания и сигнализации, освещение остановочных павильонов и участков маршрутов, активные информационные табло, видеокамеры, системы связи и т. п. В некоторых системах ГЭТа количество шкафов питания такой нагрузки, присоединенных к контактной сети 600 В, может достигать нескольких десятков и даже сотен штук, а суммарное энергопотребление за период может быть значительным. Проблемой для полного инструментального замера элементов баланса в СТЭ является тот факт, что стационарная нагрузка, как правило, не оснащена приборами учета.

В силу этого инструментальный замер потерь в системе невозможен. В источнике [6] указано, что «...на уровне предприятия  $K_s$  [коэффициент, учитывающий потери в системе электроснабжения –  $\eta_{\text{ККС}}$ ] может определяться на основе экспериментальных данных», однако методика такого определения не приведена.

Бортовые счетчики, как правило, подключены к токоприемникам и являются двунаправленными, т. е. регистрируют как прямое потребление энергии из ККС ( $E_{\text{элс}}$ ), так и выдаваемую в ККС рекуперативную энергию на полезную нагрузку ( $E_{\text{рек. полез}}$ ) за вычетом части ее, потребленной бортовой нетяговой нагрузкой, находящейся в цепи между рекуперирующим тяговым электродвигателем и бортовым счетчиком.

Потери энергии при питании полезной нагрузки в СТЭ ГЭТа возникают



на тяговой подстанции в ходе преобразований в понизительных трансформаторах и в выпрямительных агрегатах –  $\Delta E_{ТП}$ ;

в контактно-кабельной сети при передаче энергии от первичных, вторичных и третичных источников питания на полезную нагрузку –  $\Delta E_{ККС}$ ;

в накопителях энергии в ходе преобразований энергии рекуперации поездов при зарядке и выдаче энергии, а также при хранении –  $\Delta E_{НЭ}$ .

За определенный период потери на тяговой подстанции  $\Delta E_{ТП}$  фиксируются в виде разницы между поданной из высоковольтной линии на вход ТП  $E_{АСКУЭ}$  и выданной на сборную шину энергией с выпрямительных агрегатов  $E_{выпр. ТП}$ :

$$\Delta E_{ТП} = E_{АСКУЭ} - E_{выпр. ТП} \quad (2)$$

Исходя из уравнения (1) суммарные потери по выпрямленной стороне в контактно-кабельной сети  $\Delta E_{ККС}$  есть разница между поступившей от всех источников в систему выпрямленной энергией напряжением 600 В и энергией, потребленной приемниками:

$$\Delta E_{ККС} = E_{выпр. ТП} + E_{рек. полезн} - E_{ЭПС} - E_{стац} \quad (3)$$

В некоторых источниках (см. таблицу) по этой теме приводятся обобщенные показатели эффективности подсистем и всей системы тягового энергоснабжения ГЭТа [7, с. 11; 8, 9].

Коэффициенты эффективности элементов СТЭ (по данным источников [8 – 10])

Элемент СТЭ	КПД
Тяговая подстанция	0,95 [8] – 0,97
Кабели тяговой сети	0,95
Контактная сеть	0,85
Вся СТЭ	0,77 (0,85 – 0,93 [9, с. 47])

Для разных типов ГЭТа исследователи установили ориентировочные показатели потерь в ККС. Так, в сетях питания метрополитена «потери энергии в контактной сети достаточно велики, растут с увеличением длины поездов и ростом скоростей, достигая 5 % и более» [10]. В городском наземном электротранспорте исследователи приводят средний коэффициент полезного действия тяговой сети ( $\eta_{ККС}$ ), равный 0,93 [8; 9, с. 47]; т. е. средние потери в сети составляют ~ 7 %. Причем в изношенных сетях потери в системах электроснабжения (интегрально – в ТП и в ККС) могут составлять до 20 % общих потерь электроэнергии при эксплуатации трамвая и троллейбуса. Отмечается также тот факт, что при номинальном напряжении на шинах тяговой подстанции 600 В напряжение на токоприемнике ЭПС может снижаться до значения 400 В, т. е. потери на передачу энергии в таких условиях могут превышать 30 % [11].

Большой разброс показателей эффективности отдельных СТЭ зависит от множества параметров, например, от степени износа оборудования ТП и кабельных и контактных сетей, длины плеча передачи энергии, объема потребления энергии на выполнение транспортной работы, погодных условий, характера рельефа участка движения, выполняемой транспортной работы, расписания движения ПС, напряжения в высоковольтной питающей линии, напряжения в ККС, объема пассажироперевозок и др. [2, 3, 11, 12].

В СТЭ ГЭТа, в которых отсутствуют накопители или имеются бортовые либо стационарные накопители, структуры электрических цепей существенно различаются, они имеют каждая свою долю потребления оплачиваемой энергии от ТП в общем объеме электропитания. В силу этих отличий потери в таких системах должны быть выведены, экспериментально подтверждены и учтены для определения наиболее эффективной схемы построения или улучшения системы электропитания с точки зрения снижения потребления

оплачиваемой энергии от первичного источника на выполнение единицы транспортной работы.

**Инструментальное измерение КПД тяговой подстанции.** Для определения полных оплачиваемых потерь энергии в СТЭ требуется определить долю потерь энергии на ТП за период (день – месяц – год). Качественные отличия оборудования и режимов эксплуатации тяговых подстанций в системах энергоснабжения ГЭТа в различных городах, а также внутри одной системы требуют непосредственного определения КПД каждой ТП и всей системы СТЭ в целом, поскольку допускаемый в теоретических источниках разброс показателей потерь достаточно широк и не учитывает сезонные зависимости и изменения расписаний, что делает весьма приближительными результаты расчетов отдельной системы питания с опорой на общие справочные данные.

Приведение объемов энергии рекуперации, циркулирующей в ККС, к показателю точки учета оплачиваемой энергии на трехфазной стороне (т. е. к месту установки АСКУЭ) для определения степени замещения ею оплачиваемой энергии от ТП заключается в учете потерь в ходе преобразований энергии в ТП, а также в кабелях и в контактных проводах и рельсах при передаче от источника до нагрузки. Последовательность этапов приведения объемов разных видов рекуперации к точке установки АСКУЭ: от входных клемм нагрузки к сборной шине ТП (учет потерь в ККС) и далее – к высоковольтному трехфазному входу ТП (учет потерь в ТП).

Для получения значения на высоковольтной стороне подстанции потерь оплачиваемой энергии  $\Delta E_{\text{АСКУЭ}}$  необходимо полученный показатель потерь по постоянному току  $\Delta E_{\text{ККС}}$  разделить на значение  $\eta_{\text{ТП}}$  коэффициента полезного действия тяговой подстанции за заданный период:

$$\Delta E_{\text{АСКУЭ}} = \frac{\Delta E_{\text{ККС}}}{\eta_{\text{ТП}}} . \quad (4)$$

Для тяговой подстанции общее значение КПД за период будет задаваться выражением

$$\eta_{\text{ТП}} = \frac{E_{\text{выпр. ТП}}}{E_{\text{АСКУЭ}}} . \quad (5)$$

При фиксации потребления энергии на высоковольтной стороне тяговой подстанции должны быть исключены сторонние потребители на участке цепи от системы АСКУЭ до выхода выпрямительного агрегата тяговой подстанции. Например, при наличии в трансформаторе обмотки питания собственных нужд ТП однофазными или трехфазными токами низкого напряжения 220 или 380 В эти выходы должны быть оснащены счетчиком переменного тока, а полученные показатели потребления собственных нужд должны быть вычтены из расхода ТП при определении ее КПД на выполнение транспортной работы по выпрямленной стороне.

Практически нигде в ГЭТе не было опыта установки счетчиков постоянного тока на участках цепи между выпрямительным агрегатом и сборной шиной. Однако в последнее время в ряде наиболее передовых предприятий для детализации производственного учета расхода энергии стали внедряться счетчики постоянного тока на вводе каждого фидера на сборную шину тяговой подстанции (см. рисунок 1). Причем устанавливаются обычно двунаправленные счетчики, поскольку современный подвижной состав с частотным приводом тяговых двигателей позволяет выдавать в ККС часть энергии рекуперации на ее повторное полезное использование сетевой нагрузкой. Определенная доля этой полезной рекуперации потребляется нагрузкой на том же фидере, на котором происходит рекуперативное торможение вагона, а другая в силу недостаточной мощности такой нагрузки на рекуперирующем фидере перетекает через сборную шину на другие фидеры, на которых достаточная нагрузка для потребления мощности рекуперации сформирована. То есть через



сборную шину протекают токи как от тяговой подстанции  $E_{\text{выпр. ТП}}$ , так и между фидерами от рекуперирующих вагонов на нагрузку (они фиксируются как обратная энергия по фидерным счетчикам – межфидерные перетоки рекуперации  $E_{\text{мф}}$ ). Чтобы выделить из общего значения прямой энергии счетчика, проходящей от сборной шины на фидеры питания  $E_{\text{фид. прям}}$ , объем полученной от ТП  $E_{\text{выпр. ТП}}$ , необходимо вычесть из этого совокупного значения за период прямой энергии счетчика значение обратной энергии фидеров  $E_{\text{мф}}$ :

$$E_{\text{выпр. ТП}} = \sum E_{\text{фид. прям}} - \sum E_{\text{мф}}. \quad (6)$$

С учетом специфики измерений в ГЭТе согласно выражению (6) формула (5) приобретает вид:

$$\eta_{\text{ТП}} = \frac{\sum E_{\text{фид. прям}} - \sum E_{\text{мф}}}{E_{\text{АСКУЭ}}}. \quad (7)$$

Предложенный способ инструментального замера КПД тяговой подстанции ГЭТа позволяет проводить его на постоянной основе, используя показатели уже имеющихся измерительных приборов на фидерах и счетчика АСКУЭ.

Детализация счетов от энергоснабжающей организации по АСКУЭ включает в себя показатели почасового энергопотребления ТП. В целях повышения точности оценки КПД работы СТЭ и для улучшения качества прогнозов энергопотребления будущих периодов функционально получение показателей стационарных и бортовых счетчиков постоянного тока может сниматься с такой же периодичностью (почасовой). В отраслевых нормативах средние значения потерь в ТП принимаются равными 0,05 [8].

В ходе исследования энергопотоков в ККС трамвая измерялись указанные в формуле (7) данные. На основе полученных значений определялся интегральный КПД этой подстанции за сутки, месяц, год. Среднее помесечное значение показателя в течение 2021 г. колебалось в диапазоне 84,6 – 90,7 процентов (рисунок 2).

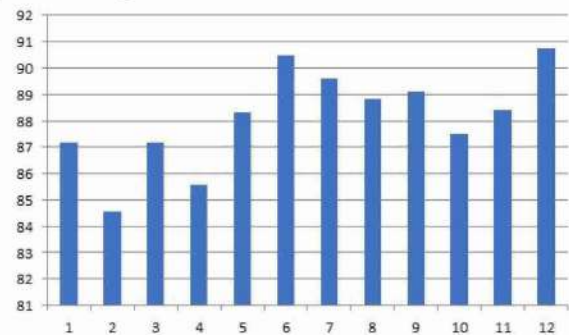


Рисунок 2 – Значение КПД исследуемой тяговой подстанции по месяцам 2021 г., %

**Экспериментальное измерение потерь оплачиваемой энергии в контактно-кабельной сети.** В системах, где перевозки производит ПС с реостатно-контакторной системой управления тягой (РКСУ), выдача рекуперации в ККС невозможна и вся электроэнергия для сетевой нагрузки поступает от тяговой подстанции. Соответственно здесь все потери энергии на активном сопротивлении ККС при ее передаче от ТП к нагрузке приходится на оплачиваемую энергию, потребляемую от высоковольтной линии.

В системах ГЭТа, где имеется ПС с системами транзисторно-инверторного управления тяговыми электродвигателями (ТрСУ), помимо энергии от ТП в ККС поступает часть энергии рекуперативного торможения поездов. Полезная рекуперативная энергия является собственным вторичным ресурсом предприятия и не закупается у энергопоставщика, так как однажды она уже была ему оплачена, будучи полученной из высоковольтной линии. Полезная рекуперация питает сетевую нагрузку и, соответственно, замещает в общем энергобалансе системы часть энергии, которая без ТрСУ поступала бы от платного источника (рисунок 3).

В среднем за 2021 г. в исследованной трамвайной системе от вторичных энергоисточников поступило 17,3 % от выданной в ККС энергии, а от тяговых подстанций – 82,7 %.



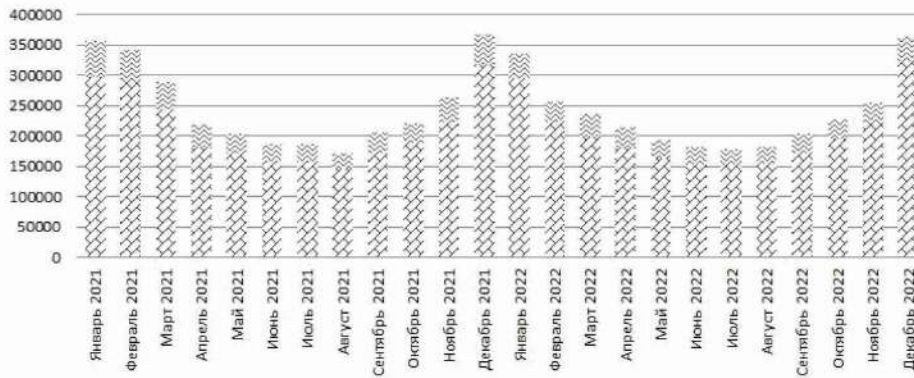


Рисунок 3 – Суммарный объем электроснабжения нагрузки на участках питания исследуемой ТП по выпрямленной стороне по месяцам 2021 – 2022 гг. от двух источников: оплачиваемого (тяговая подстанция –  $E_{\text{выпр. ТП}}$ , нижние столбцы) и бесплатного (полезная рекуперация вагонов –  $E_{\text{рек. полезн.}}$ , верхние столбцы), кВт · ч

Поскольку полезная рекуперация транспортируется по ККС, то часть ее теряется на активном сопротивлении кабелей и проводов. То есть появление в СТЭ энергии рекуперации с нулевой закупочной стоимостью снижает потребление оплачиваемой энергии в общем объеме энергопотребления от ТП, включая транспортные потери ее  $\Delta E_{\text{ККС. ТП}}$ , и увеличивает потребление вторичной неоплачиваемой энергии и, как следствие, сетевые потери этой последней  $\Delta E_{\text{ККС. рек}}$  (рисунок 4). При этом расчет доли потерь неоплачиваемой энергии рекуперации может производиться на основе одинаковых параметров этой ККС, определяющих потери оплачиваемой части энергопотребления от ТП (длина плеча передачи энергии и величина удельного сопротивления проводов и кабелей).

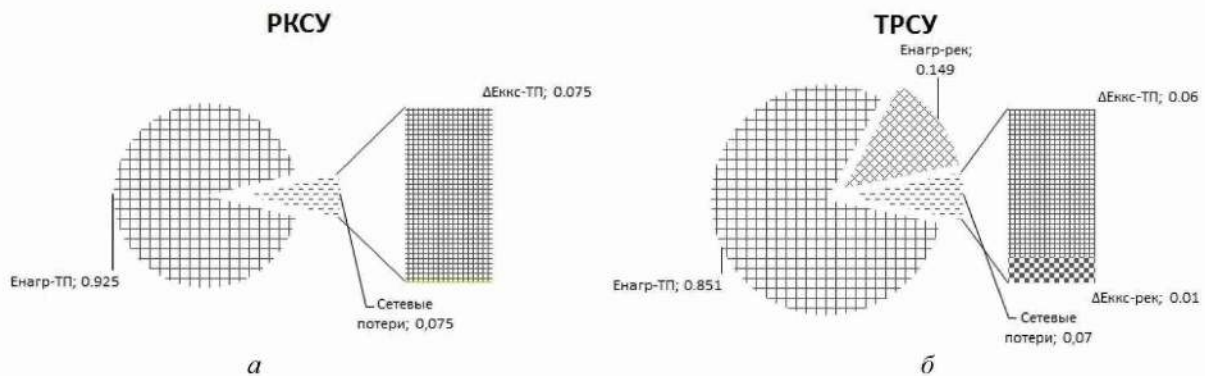


Рисунок 4 – Структуры расхода энергии, выделяемой в ККС источниками (ТП и рекуперирющими поездами) и потребляемой на клеммах нагрузки, и доли сетевых потерь энергии в ККС от этих источников с PKСУ (а) и с ТрСУ (б):  $\Delta E_{\text{ККС. ТП}}$  – потери в ККС оплачиваемой энергии от первичного источника;  $\Delta E_{\text{ККС. рек}}$  – потери в ККС бесплатной полезной энергии рекуперации при движении на линии поездов)

Тяговая подстанция ГЭТа не участвует в преобразованиях и передаче полезной рекуперативной энергии и, соответственно, не вносит своей добавки в ее потери, т. е. при полезной рекуперации в ККС нет составляющей потери энергии при преобразованиях в ТП. В силу этого объем энергии при питании одной и той же нагрузки за единичный период времени только от первичного источника ( $E_{\text{нагр. ТП}}$ ), включая все потери ее (в ККС и на ТП), всегда больше, чем объем энергии для питания этой же нагрузки ( $E_{\text{нагр. рек}}$ ) за одинаковое время только от вторичного источника (рекуперирующего поезда), включая все ее потери:

$$\frac{E_{\text{нагр. ТП}}}{\eta_{\text{ТП}} \cdot \eta_{\text{ККС}}} > \frac{E_{\text{нагр. рек}}}{\eta_{\text{ККС}}} \quad (8)$$



В основу экспериментального способа определения потерь в ККС положено уравнение баланса (1). Условием его реализации является оснащённость двунаправленными по постоянному току счетчиками энергии всех фидеров тяговых подстанций и всех единиц подвижного состава. Измерения производятся при нормальной перевозочной работе в обычный рабочий день (например, по расписанию буднего дня), лучше – ежедневно, данные счетчиков фиксируются по итогам суток.

Общее уравнение энергобаланса всей системы за время измерений (1) с детализацией потерь в ККС (например, за день или месяц) имеет вид

$$E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}} = E_{\text{ЭПС}} + \Delta E_{\text{ЭПС}} + (E_{\text{стан}} + \Delta E_{\text{стан}}). \quad (9)$$

Исходя из этого за период измерений КПД контактно-кабельной сети описывается в общем виде уравнением:

$$\eta_{\text{ККС}} = \frac{E_{\text{ЭПС}} + E_{\text{стан}}}{E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}}}. \quad (10)$$

Наиболее простой вариант для экспериментального определения потерь энергии в ККС осуществляется для СТЭ, в которых стационарная сетевая нагрузка отсутствует, а весь подвижной состав состоит из поездов с РКСУ, в которых рекуперативная энергия отсутствует. В таких случаях в уравнении (9) значения  $E_{\text{стан}}$ ,  $\Delta E_{\text{стан}}$  и  $E_{\text{рек. полезн}}$  – нулевые.

Если на маршрутах ходят все вагоны с ТрСУ, т. е. где имеется рекуперативная энергия, а стационарная нагрузка также отсутствует, то  $\eta_{\text{ККС}}$  будет основываться также на фактически измеренных данных по указанным счетчикам и в уравнении (9) нулевое значение будет у показателей  $E_{\text{стан}}$  и  $\Delta E_{\text{стан}}$ .

В некоторых наиболее современных системах ГЭТа широко используется стационарное оборудование, участвующее в обслуживании перевозочного процесса: автоматизированные переводы стрелок, обогреватели стрелок, системы отслеживания и сигнализации, освещение остановочных пунктов и участков маршрутов, активные информационные табло, видеокамеры, системы связи и т. п. При наличии в ККС питаемого стационарного оборудования проводится определение средних значений потребления энергии этих устройств в СТЭ за период. Например, без движения ЭПС производится измерение фидерными счетчиками потребления энергии штатным стационарным оборудованием ККС на участках данной ТП. Баланс энергии в таких условиях отсутствия на линии ЭПС исходя из уравнения (9) описывается формулой

$$E_{\text{выпр. ТП, изм}} = E_{\text{стан, изм}} + \Delta E_{\text{стан, изм}}, \quad (11)$$

где  $E_{\text{стан, изм}}$  – расход энергии на клеммах стационарного потребляющего оборудования, а  $\Delta E_{\text{стан-изм}}$  – потери при передаче энергии по ККС только на питание стационарной нагрузки.

На этом этапе выделить  $\Delta E_{\text{стан}}$  из  $E_{\text{выпр. ТП}}$  пока невозможно, так как инструментально измеряется только  $E_{\text{выпр. ТП}}$ , а стационарная нагрузка не оснащена счетчиками. Полученное за указанный период значение  $E_{\text{выпр. ТП, изм}}$  потребления стационарной нагрузкой и потерь при этом в ККС экстраполируется для этих показателей на весь рассматриваемый период работы СТЭ. В период работы подвижного состава на линии значение мощности потребления энергии на вводных клеммах стационарного оборудования не изменяется (или мощность потребления этого оборудования изменяется незначительно в сравнении с ночным потреблением), а такое оборудование обычно работает все время. Как правило, на участках питания одной ТП может работать стационарное оборудование, номинальная мощность энергопотребления которого не превышает нескольких киловатт, коэффициент загрузки меньше единицы, а суточный объем энергопотребления не превышает 10 – 50 кВт·ч. Доля этого объема составляет меньше

полупроцента от выдаваемой выпрямительным агрегатом ТП энергии, а относительного полного объема энергии источников ( $E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}}$ ) еще меньше, т. е. находится на уровне погрешности измерений. От этого объема энергопотребления потери энергии при транспортировке по ККС на питание стационарной нагрузки как минимум на порядок меньше, чем само ее энергопотребление. В силу этого с учетом малости потерь энергии при транспортировке на питание стационарной нагрузки для определения  $\eta_{\text{ККС}}$  можно принимать во внимание только потери энергии на передачу для питания подвижного состава, как это фактически сделано в нормативных отраслевых рекомендациях [8]. С учетом этого формула (10) для определения  $\eta_{\text{ККС}}$  принимает вид:

$$\eta_{\text{ККС}} = \frac{E_{\text{эпс}} + (E_{\text{стан}} + \Delta E_{\text{стан}})}{E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}}}, \quad (12)$$

где  $(E_{\text{стан}} + \Delta E_{\text{стан}})$  – экстраполированное на рассматриваемый период измеренное значение энергопотребления стационарной нагрузки и потерь при передаче этой энергии в период без движения подвижного состава ( $E_{\text{стан. изм}} + \Delta E_{\text{стан. изм}}$ ). При установлении абсолютного объема транспортных потерь энергии на питание штатной стационарной нагрузки используется полученное во время первого измерения без ЭПС по выражению (12) значение  $\eta_{\text{ККС}}$ :

$$\Delta E_{\text{ККС}} = E_{\text{выпр. ТП. изм}} \cdot (1 - \eta_{\text{ККС}}). \quad (13)$$

Рассчитанное по формуле (12) значение  $\eta_{\text{ККС}}$  позволяет определять объем транспортных потерь при электропотреблении сети в периоды с близкими значениями температуры окружающей среды. Таким образом, инструментальное определение этого показателя с использованием современных приборов учета даст возможность точно прогнозировать объемы оплачиваемой энергии, в том числе ее потерь, в будущие периоды при различных параметрах работы транспортной системы и внешних погодных условиях.

Чтобы определить по трехфазной стороне абсолютное значение оплачиваемого объема потерь, необходимо привести полученное на выпрямленной стороне значение потерь энергии, выдаваемой от выпрямителя ТП, к значению на счетчике АСКУЭ согласно формуле (4), т. е. с учетом потерь этой энергии при ее преобразованиях на тяговой подстанции. Для этого необходимо полученное значение потерь энергии по выпрямленной стороне (13) (с учетом формулы (6)) разделить на КПД тяговой подстанции, определенный по уравнению (7):

$$\Delta E_{\text{АСКУЭ}} = \frac{\Delta E_{\text{ККС}}}{\eta_{\text{ТП}}} = \frac{(E_{\text{фид. прям}} - E_{\text{мф}}) \cdot (1 - \eta_{\text{ККС}})}{\eta_{\text{ТП}}}. \quad (14)$$

**Практическое использование показателей потерь энергии на ТП и в ККС.** Основанный на измеренных данных показатель потерь при передаче энергии по ККС на питание полезной сетевой нагрузки (стационарной и подвижной) позволяет найти объем дошедшей до нагрузки энергии от направленной в сеть всеми ее источниками и определить отклонение доли потерь от нормативно заданного показателя. Как уже было сказано, среднее нормативное значение КПД контактно-кабельной сети в большинстве отечественных исследовательских работ и отраслевых нормативных документов для ГЭТа рекомендуется принимать в размере 0,93, т. е. при использовании нормативного значения потерь в контактной сети потери энергии  $\Delta E_{\text{ККС}}$  составляют за длительный период порядка 7 % от переданной энергии. Это значение было установлено в документе от 2013 г. [6] для сети, когда практически весь подвижной состав ГЭТа был с РКСУ, т. е. не имел возможности выдачи в ККС энергии рекуперации на повторное использование сетевой нагрузкой. С тех пор появление подвижного состава с ТрСУ и массовая замена им подвижного состава с РКСУ



привели как к перераспределению потоков и объемов циркулирующей энергии в ККС, так и к изменению объема и доли потерь оплачиваемой энергии. При замене ЭПС с РКСУ на поезда с ТрСУ не изменяется эффективная длина питания стационарной и подвижной нагрузки от первичного источника. Однако уменьшается объем энергопотребления от ТП в силу снижения главным образом тягового энергопотребления вагонов из-за работы тяговых частотных преобразователей, которые снижают в сети пиковые токи от ТП благодаря выдаче в сеть полезной рекуперации, а также замене тяговых двигателей постоянного тока на более эффективные асинхронные электромашины; изменяется и нетяговое потребление ЭПС. При этом абсолютное значение потерь оплачиваемой энергии в общем энергопотреблении сети снижается на долю уменьшения потребления энергии от ТП. То есть при сохранении электрических параметров ККС – сопротивления и длины кабелей и контактных проводов, а также суммарного энергопотребления всеми видами нагрузки – нормативный  $\eta_{\text{ККС}}$  при передаче оплачиваемой энергии питания с ТП можно признать таким же, как и в случае движения по линии вагонов с РКСУ при одинаковых условиях. При этом абсолютное значение энергопотребления от ТП и доля этой энергии в общем потреблении сети уменьшаются за счет повторного использования бесплатной полезной энергии рекуперации.

Следовательно, для увеличения энергоэффективности транспортной работы необходимо принимать меры по увеличению объемов полезных перетоков энергии рекуперации по ККС, что после полного переоснащения подвижного состава на системы тяги с ТрСУ возможно, например, путем внедрения стационарных управляемых накопителей энергии.

При проведении модернизации действующей или проектировании новой контактной сети значение  $\eta_{\text{ККС}}$  на основе постоянно измеряемых данных позволяет сформировать численные критерии для выбора планируемого к применению типа контактного провода и фидерного кабеля для обеспечения экономически приемлемого сечения с целью снижения непроизводительных потерь в проводе. На этот выбор главное влияние оказывают: объем экономии оплачиваемой энергии за срок  $T$  службы контактного провода и стоимость его закупки:

$$\Delta C = \Sigma C_{\text{эо}} - K_{\text{ф.к.п}}, \quad (15)$$

где  $\Delta C$  – экономический эффект по снижению транспортных потерь энергии от применения выбранных фидерных кабелей и контактного провода;  $C_{\text{эо}}$  – стоимость экономии на потерях оплачиваемой энергии в год;  $K_{\text{ф.к.п}}$  – стоимость закупки и внедрения фидерного кабеля и контактного провода.

Наличие измененных значений показателей КПД тяговой подстанции и контактно-кабельной сети позволяет выстраивать подкрепленный расчетами баланса энергии в СТЭ на основе фактических данных набор технических требований к подвижному составу, планируемому к приобретению предприятием, для обеспечения минимизации потребления энергии на тягу и нетяговые нужды с целью снижения транспортных потерь токов в ККС и при преобразованиях в ТП. Такие требования относятся к минимизации веса тары вагона при сохранении или увеличении пассажироместности, умеренному энергопотреблению на обогрев и кондиционирование воздуха салона для поддержания нормальной температуры, обеспечению малого энергопотребления на внешнее и внутреннее освещение за счет применения энергоэффективных ламп при улучшении уровня освещенности, снижению удельного энергопотребления на тягу на 1 тоннокилометр транспортной работы и т. д.

Помимо этого показатели КПД тяговой подстанции и контактно-кабельной сети применяются для расчета прогнозов экономии оплачиваемой энергии от ТП при использовании различных типов накопителей как стационарного, так и бортового исполнения [4]. Эффект экономии накопителями достигается благодаря перенаправлению на выполнение полезной транспортной работы избыточной энергии рекуперации, которая имеется у ЭПС с ТрСУ в СТЭ

без накопителей. Здесь следует отметить, что действительный КПД управляемых накопителей энергии для ГЭТа, в которых используются накопительные элементы любого применимого для электротранспорта типа (суперконденсаторные или маховиковые), не превышает в настоящее время значения 0,64 [13, 14], тогда как установленный нормативно показатель КПД контактно-кабельной сети равен 0,93 [6]. То есть потери в накопителях на единицу принятой энергии рекуперации минимум в пять раз превышают ее потери в тяговых сетях.

С учетом низкого КПД буферных накопителей с накопительными элементами любого типа для максимизации эффекта вовлечения на полезную работу неоплачиваемой энергии избыточной рекуперации наиболее предпочтительно применение таких типов накопителей энергии, которые полностью сохраняют межпоездные полезные перетоки рекуперации по контактной сети, существующие в этих системах при отсутствии накопителей. Поскольку без накопителя полезно задействовать всю избыточную рекуперацию не удастся, то единственной возможностью этого при сохранении сетевых перетоков рекуперации является применение стационарных накопителей энергии. Полное задействование избыточной рекуперации с сохранением сетевых перетоков полезной рекуперации позволяет максимально снизить абсолютное значение потребления оплачиваемой энергии от ТП, следовательно, и потерь оплачиваемой энергии при передаче по ККС. То есть чтобы снизить потери бесплатной энергии рекуперации в процессах преобразования ее в накопителях, требуется минимизировать объемы энергии, поступающей в них, для чего нужно сохранить существующие перетоки полезной рекуперации по ККС и добавить действие эффекта питания полезной сетевой нагрузки в ходе зарядки стационарного накопителя («эффекта КБК» [15]). Такой возможностью в силу свойств структуры электрической схемы обладают только накопители стационарного размещения. При установке накопителей энергии на борту поезда возможность межпоездных перетоков рекуперации теряется, т. е. потери от всего объема рекуперации увеличиваются с 7 до 36 % [4].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

При замене подвижного состава на поезда с ТрСУ доля расхода оплачиваемой энергии от первичного источника по выпрямленной стороне ТП снижается на 10 – 20 %.

КПД ТП показывает уровень потерь энергии при снижении трансформатором входного напряжения и его выпрямлении. В период экспериментальных исследований на действующей ТП в течение почти полутора лет ежемесячное значение ее КПД варьировалось в диапазоне 0,846 – 0,907.

Эффективность ККС определяет уровень транспортных потерь энергии при питании сетевой нагрузки от ТП и от рекуперующих вагонов. Бесплатная энергия рекуперации замещает оплачиваемую энергию от ТП. Транспортные потери бесплатной энергии рекуперации замещают в ККС потери оплачиваемой энергии от ТП.

Нормативно установленные потери оплачиваемой энергии по выпрямленной стороне системы тягового энергоснабжения ГЭТа при движении подвижного состава с РКСУ приняты в размере до 7 %, а на тяговой подстанции – 5 % [9].

Экспериментальное установление значений КПД тяговой подстанции и контактно-кабельной сети по предложенному способу при современном уровне оснащения СТЭ и ЭПС приборами учета энергии является простой задачей, методически и экономически доступной для практической реализации на любом предприятии ГЭТа страны.

Транспортные потери бесплатной энергии рекуперации при перетоках по ККС (нормативно – до 7 %) в пять – шесть раз меньше, чем потери энергии рекуперации при использовании бортовых накопителей (36 %), электрическая схема использования которых не допускает сетевых перетоков рекуперации, т. е. в бортовых накопителях имеют место максимальные потери энергии (как рекуперации, так и от первичного источника) среди всех типов источников энергоснабжения в ГЭТе.

Увеличение перетоков рекуперации по ККС не только снижает абсолютное потребление оплачиваемой энергии от ТП на выполнение полезной транспортной работы, но и уменьшает потери оплачиваемой энергии.



Мониторинг фактических показателей потерь энергии в ККС позволяет разрабатывать организационные и технические меры для снижения этих потерь, что делает возможным значительно уменьшить потребление оплачиваемой электроэнергии от тяговых подстанций.

При преобладании внутрифидерных перетоков рекуперации на участках ТП транспортные потери в ККС рекуперативной энергии ниже, чем при питании этой же нагрузки от ТП, а при преобладании межфидерных перетоков – наоборот. При этом закупочная цена энергии рекуперации нулевая.

Абсолютное значение отпускаемого источником объема энергии при питании одной и той же нагрузки за единичный период времени от первичного источника (ТП), включая все потери ее (в ККС и на ТП), всегда больше, чем объем энергии от вторичного источника (рекуперированного поезда), включая все ее потери, за счет того, что в передаче рекуперативной энергии на нагрузку в ККС тяговая подстанция не участвует, следовательно, отсутствуют потери, присущие работе ТП.

### Список литературы

1. Спиридонов, Е. А. Оценка влияния характеристик троллейбуса на эффективность рекуперативного торможения / Е. А. Спиридонов, М. В. Ярославцев, Е. А. Хайленко. – Текст : непосредственный // Электропривод на транспорте и в промышленности : труды всерос. науч.-практ. конф. / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2018. – С. 235–243. – EDN YTZVBZ.

2. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2 (54). – С. 106–111. – EDN SJBUFB.

3. Черемисин, В.Т. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (65). – С. 114–120.

4. Кацай, А. В. Влияние буферных накопителей бортового и стационарного типа на энергопотребление тяговых подстанций в горэлектротранспорте / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 542–560.

5. Кацай, А. В. Структура потоков энергии рекуперации в контактной сети тяговой подстанции с наземным накопителем / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 48–79. – DOI 10.15593/2224-9397/2023.1.03. – EDN ZHENIV.

6. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р. – Текст : непосредственный.

7. Загайнов, Н. А. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса / Н. А. Загайнов, Б. С. Финкельштейн. – Москва : Транспорт, 1978. – 336 с. – Текст : непосредственный.

8. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. (в ред. распоряжения Минтранса России № НА-143-р от 25.12.2013). – Текст : непосредственный.

9. Хвостов, В. А. Тяговые расчеты на городском электротранспорте : учебное пособие / В. А. Хвостов, Р. В. Воскресенский. – Брянск : Брянский ин-т транспортного машиностроения, 1987. – 72 с. – Текст : непосредственный.

10. Лянда, А. А. Методы снижения расходов энергии на движение поездов метрополитена / А. А. Лянда, С. Ю. Козлов. – Текст : непосредственный // Проектирование, строительство и

эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения : сборник статей / под ред. М. О. Лебедева. – Москва : Перо, 2021. – С. 162–176. – EDN NMBUZI.

11. Ярославцев, М. В. Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ярославцев Михаил Викторович ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2016. – 22 с. – Текст: непосредственный. – EDN ZQGJVH.

12. Гречишников, В. А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене / В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 5 (49). – С. 54–58. – EDN RVRXND.

13. Кацай, А. В. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30. – № 4 (76). – С. 127–141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9. – EDN AMJPCB.

14. Чернигов, В. М. Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем / В. М. Чернигов // mapget.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL:[http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET\\_NTS\\_Chergos.pdf](http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf) (дата обращения: 14.03.2023).

15. Кацай, А. В. Эффект питания полезной сетевой нагрузки избыточной энергией рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя / А. В. Кацай, А. А. Бизяев, В. А. Козаревич. – Текст : непосредственный // Энергетические системы. – 2022. – № 4. – С. 80–86. – DOI 10.34031/ES.2022.4.008. – EDN MVMOSH.

## References

1. Spiridonov E. A., Yaroslavtsev M. V., Khailenko E. A. [Assessment of the influence of trolleybus characteristics on the effectiveness of regenerative braking]. *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti : trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Electric drive in transport and industry : proceedings of the All-Russian scientific and practical Conference]. Khabarovsk, 2018, pp. 235-243, EDN YTZVBZ (In Russian).

2. Cheremisin V.T., Vilgelm A.S., Nezevak V.L. Evaluation of technological losses in traction network in conditions of regenerative braking by electric rolling stock. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov state university of railway engineering*, 2014, no. 2 (54), pp. 106-111, EDN SJBUFB (In Russian).

3. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vilgelm A.S. Main thesis of methodology for assessing useful energy recovery efficiency. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov state university of railway engineering*, 2017, no. 1 (65), pp. 114-120 (In Russian).

4. Katsai A.V., Shevlyugin M.V. The influence of buffer storages of on-board and wayside types on the energy consumption of traction substations in electric transport. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2023, no. 4, pp. 542-560 (In Russian).

5. Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Structure of energy recovery flows in the contact network of a traction substation with a wayside storage. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia – Bulletin of Perm national research polytechnic university. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2023, no. 45, pp. 48-79. DOI 10.15593/2224-9397/2023.1.03, EDN ZHENIV (In Russian).

6. Methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban transport by road and urban ground electric public transport. Appendix to the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. April 18, 2013. No. NA-37-R (In Russian).

7. Zagainov N.A., Finkelstein B.S. *Tjagovye podstancii tramvaja i trollejbusa* [Traction substations of tram and trolleybus]. Moscow, Transport Publ., 1978, 336 p. (In Russian).



8. Methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban transport by road and urban ground electric public transport. As amended by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation no. NA-143-r, 25.12.2013 (In Russian).

9. Khvostov V.A., Voskresensky R.V. *Tjagovye raschety na gorodskom elektrotransporte : uchebnoe posobie* [Traction calculations on urban electric transport : a textbook]. Bryansk, Bryansk Institute of Transport Engineering Publ., 1987, 72 p. (In Russian).

10. Landa A.A., Kozlov S.Yu Methods to reduce the energy consumption for traction of subway trains. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiia podzemnykh sooruzhenii transportnogo naznacheniiia : sbornik statei* [Design, construction and operation of underground structures for transport purposes : a collection of articles]. Moscow, Stylus Publ., 2021, pp. 162-176 (In Russian).

11. Yaroslavtsev M.V. *Energoeffektivnyi tiagovyi privod gorodskogo bezrel'sovogo transporta* (Energy-efficient traction drive of urban railless transport). Doctor's thesis abstract, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2016, 22 p. (In Russian).

12. Grechishnikov V.A., Shevlyugin M.V. Operation of power storage device in Moscow Metro. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2013, vol. 11, no 5 (49), pp. 54-58 (In Russian).

13. Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Efficiency coefficients of the energy storage device in the contact network of the city electric transport. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2022, vol. 30, no. 4 (76), pp. 127-141. DOI 10.14498/tech.2022.4.9. (In Russian).

14. Chernigov V.M. *Elektrooborudovanie tramvainogo vagona s emkostnym nakopitelem* [Chernigov V. M. Electrical equipment of a tram car with a capacitive accumulator]. Available at: URL:[http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET\\_NTS\\_Chergos.pdf](http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf) (accessed 14.03.2023).

15. Katsay A., Bizyaev A., Kozarevich V. The effect of powering the network payload with excess energy recovery during charging of a stationary storage device. *Energeticheskie sistemy – Energy system*, 2022, no. 4, pp. 80-86. DOI 10.34031/ES.2022.4.008., EDN MVMUCH (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Кацай Александр Владимирович

ООО «Кинемак».

Южнопортовая ул., д. 40, стр. 3, г. Москва, 115088, Российская Федерация.

Кандидат философских наук, генеральный директор, ООО «Кинемак».

Тел.: +7 (916) 248-02-44.

E-mail: proton764@mail.ru

### Шевлюгин Максим Валерьевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9., г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 274-02-74, доб. 37-63.

E-mail: mx\_sh@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кацай, А. В. Экспериментальное определение объемов оплачиваемых потерь электроэнергии в контактной сети городского электротранспорта с рекуперацией / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 116 – 130.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Katsay Alexander Vladimirovich

LLC Kinemak.

40, b. 3, Yuzhnoportovaya st., 115088, Moscow.

Ph. D. in Philosophical Sciences, general director, LLC Kinemak.

Phone: +7 (916) 248-02-44.

E-mail: proton764@mail.ru

### Shevlyugin Maxim Valeryevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

Obraztsova st., 9, b. 9, Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, associate professor, head of the department «Electric Power Engineering of Transport», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 274-02-74, ext. 37-63.

E-mail: mx\_sh@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Experimental determination of the volume of paid electricity losses in the contact network of urban electric transport with recovery. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 116-130 (In Russian).

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies»

№ 1 (57) 2024

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» ([www.akc.ru](http://www.akc.ru)) – E28002.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

С июля 2011 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:  
644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;  
тел.: +7 (3812) 31-05-54;  
e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 25.03.2024.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 29.03.2024.



