

**Е. А. Третьяков, В. Т. Черемисин**

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СТАЦИОНАРНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

**Аннотация.** В статье представлены основные направления реализации интеллектуальной энергетической инфраструктуры при электроснабжении стационарных потребителей железных дорог. Выполнено имитационное моделирование технических решений в области информационно-управляющих систем координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в электрических сетях стационарных потребителей железных дорог на основе мультиагентного подхода применительно к реальному участку электроснабжения. Представлена структурная схема работы интеллектуального электронного устройства подстанционного уровня. Для снижения перегрузки, повышения пропускной способности реализован перспективный подход к реконфигурации системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе решения задач оптимизации нормальных режимов и минимизации потребления электроэнергии без расчета установившихся режимов в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию. Предложен алгоритм автоматического восстановления нормального режима в электрических сетях железных дорог.

Результаты исследований показали техническую эффективность представленных алгоритмов информационно-управляющих систем координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в электрических сетях стационарных потребителей железных дорог. Ожидаемое расчетное повышение надежности электроснабжения (сокращение отказов технических средств, среднее число отключений) составляет 7 %, снижение потерь мощности – 23 %, повышение пропускной способности – до 41 %, сокращение затрат на содержание энергетической инфраструктуры – 12 %. Срок окупаемости составит менее 6 лет при условии цифровизации тяговых и трансформаторных подстанций железных дорог.

**Ключевые слова:** эффективность, интеллектуальная энергетическая инфраструктура, электроснабжение, стационарные потребители, моделирование.

**E. A. Tretyakov, V. T. Cheremisin**

<sup>1</sup> *Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation*

## **ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF INTELLECTUAL ENERGY INFRASTRUCTURE OF RAILWAYS WITH POWER SUPPLY OF STATIONARY CONSUMERS**

**Abstract.** The article presents the main directions of the implementation of intelligent energy infrastructure when supplying power to stationary consumers of railways.

Simulation modeling of technical solutions in the field of information and control systems for coordinated control of voltage, power flows, reconfiguration, restoration of normal mode in electrical networks of stationary railroad consumers was carried out on the basis of a multi-agent approach as applied to the real section of power supply. The block diagram of the operation of an intelligent electronic device of the substation level is presented. To reduce congestion, increase throughput, a promising approach to the reconfiguration of the power supply system for stationary railway consumers was implemented based on solving the problems of optimizing normal modes and minimizing electricity consumption without calculating the steady-state modes at the rate of changes in the demand for electricity. An algorithm for automatic restoration of normal operation in electric networks of railways is proposed.

The research results have shown the technical efficiency of the presented algorithms of information and control systems for coordinated control of voltage, power flows, reconfiguration, restoration of normal mode in electric networks of stationary railway consumers. The expected calculated increase in the reliability of power supply (reduction of failures of technical means, the average number of outages) is 7%, a decrease in power losses - 23%, an increase in throughput - up to 41%, a reduction in the cost of maintaining the energy infrastructure - 12%. The payback period will be less than 6 years, subject to the digitalization of traction and transformer substations of railways.

**Keywords:** *efficiency, smart energy infrastructure, power supply, stationary consumers, modeling.*

## **Введение**

Электросетевой комплекс холдинга «РЖД» является крупнейшим в России в части оказания услуг по передаче электроэнергии по электрическим сетям стационарным потребителям. В последние годы появились новые концепции и технологии, направленные на создание устойчивой, эффективной, гибкой и интеллектуальной электрической инфраструктуры [1].

Применение в электрических сетях технологий, основанных на адаптации характеристик оборудования к режимам работы электроэнергетических систем, активное взаимодействие с генерацией (накоплением) и потребителями позволяют создавать эффективно функционирующую систему, в которую встраиваются современные информационно-диагностические комплексы [2], системы автоматизации управления всеми элементами, включенными в процессы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии [3-4].

В соответствии со стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года, с приоритетными направлениями Национальной технологической инициативы EnergyNet разработка принципов, методов и механизмов формирования интегрированных интеллектуальных энергетических систем с различными типами средств централизованного, местного регулирования и активными потребителями является весьма актуальной задачей [5-6].

В настоящее время продолжается внедрение цифровых тяговых подстанций на сети железных дорог, что позволяет реализовать технологии управления Smart Grid, диагностику состояния оборудования. Аналогично начинается постепенный переход к электрической сети нового технологического уклада с качественно новыми характеристиками надежности, эффективности, доступности, управляемости и клиентоориентированности электроэнергетической инфраструктуры.

Под электрической сетью нового технологического уклада понимается электроэнергетическая система, характеризующаяся среди прочего следующими технологиями [7-8]:

- многоагентные интеллектуальные системы управления для создания адаптивных самовосстанавливающихся систем электроснабжения железных дорог;
- средства искусственного интеллекта, которые позволяют реализовать управление энергетическими объектами с неизвестной математической моделью на основе процедур распознавания образов, планирования действий и накопления знаний;
- системы управления поддержки принятия решений, использующих алгоритмы машинного обучения, например, основанные на нейронных сетях, с высокой степенью распараллеливания процессов обработки информации в реальном времени;
- системы управления, основанные на знаниях (экспертные системы);
- промышленный интернет вещей, обеспечивающий сбор данных от распределенных энергообъектов;
- распределенные реестры, обеспечивающие автоматизированное взаимодействие смежных бизнес-процессов с энергетической инфраструктурой железных дорог;
- большие данные, обеспечивающие инструменты структурирования и обработки значительного объема данных для решения задач повышения эффективности системы электроснабжения железных дорог;
- виртуальная и дополненная реальность, цифровой двойник.

Как правило, существующие системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог выполнены в виде иерархических структур от источника к нагрузке, имеют низкую наблюдаемость параметров режима, недостаточную оснащенность линейными регуляторами и элементами автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций для повышения энергоэффективности процессов передачи и распределения электрической энергии. Оценка эффективности перспективных интеллектуальных методов

управления транспортом и распределением электрической энергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных представляется весьма актуальным.

Под эффективностью внедрения интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог при электроснабжении стационарных потребителей будем в дальнейшем понимать технический эффект в натуральных показателях без рассмотрения капитальных затрат и экономических показателей внедрения указанных технологий, что является предметом прочих исследований авторов.

Несмотря на то, что научные исследования в области интеллектуальных электроэнергетических систем весьма обширны [9-12], на железнодорожном транспорте они имеют значительный потенциал развития: особенно в части информационно-управляющих систем, технологического управления и диагностики состояния электрооборудования в рамках концепций «Цифровая тяговая подстанция», «Цифровая железная дорога».

#### **Методология исследования.**

Основой создания интеллектуальной системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог с учетом перспективных требований при развитии технологий Smart Grid может служить метод на базе мультиагентного подхода, включающего в себя архитектуру с распределенными центрами принятия решений – управляющими контроллерами, которые содержат средства прогнозирования изменений параметров режима и средства самоорганизации на основе оперативной оценки результатов управления и разделены по функциональному назначению с изменяемой зоной ответственности.

В качестве управляющих систем в пределах участка электрической сети с питающей подстанцией могут выступать программно-технические комплексы (ПТК), а в качестве самоорганизующихся контроллеров – интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) на базе промышленных компьютеров.

Рассмотрим результаты имитационного моделирования ряда разработанных технических решений в области информационно-управляющих комплексов на основе мультиагентного подхода применительно к реальному участку электроснабжения стационарных потребителей железных дорог [13]. Моделирование выполнено в программном комплексе, имитирующем ПТК интеллектуальной системы автоматического управления транспортом и распределением электрической энергии в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, обеспечивающий следующие основные функции:

- автоматическое поддержание оптимальных (квазиоптимальных) уровней напряжения в контролируемой зоне электрической сети с учетом влияния тяговой нагрузки;
- автоматическое координированное интеллектуальное управление распределенными средствами регулирования напряжения и средствами компенсации реактивной мощности, устройствами FACTS, накопителями, генерацией, спросом активных потребителей для стабилизации напряжения, исключения перегрузки (повышение пропускной способности) энергообъектов электрической сети, снижения потерь электроэнергии и затрат на нее;
- автоматическая реконфигурация электрической сети для оптимизации или восстановления нормального режима.

Архитектура связей ПТК для питающей подстанции и контролируемого участка электрической сети включает в себя автоматизированное место (АРМ) с серверами, коммутаторами, контроллеры связи и управления, коммутаторы сети, интеллектуальные электронные устройства (подстанционный уровень), интеллектуальные электронные устройства (уровень присоединения), объекты управления, устройства сопряжения с измерительными устройствами (полевой уровень).

ИЭУ подстанционного уровня предназначено для реализации рассматриваемых алгоритмов в качестве управляющего контроллера и может быть выполнено на базе промышленного компьютера в виду отсутствия жестких требований по времени выработки управляющих воздействий и достаточно сложных оптимизационных расчетов, методов обработки данных, требующих значительных вычислительных ресурсов.

ИЭУ уровня присоединения имеет свободно программируемую логику, может быть выполнено на базе контроллера и предназначено для реализации алгоритмов автоматики элементов системы электроснабжения, т.е. выступает в качестве локального контроллера исполнительных устройств (энергообъектов).

Имитационное моделирование выполнялось на основе математической (цифровой) модели электрической сети 10/0,4 кВ сторонних потребителей дистанции электроснабжения в разработанном программном обеспечении [14] в соответствии со структурной схемой работы ИЭУ подстанционного уровня с имитацией обратной связи (рис. 1). Отличительной особенностью указанного ПТК является применение алгоритмов самоорганизации, экспертных систем при координированном управлении распределенными энергообъектами в реальном времени.

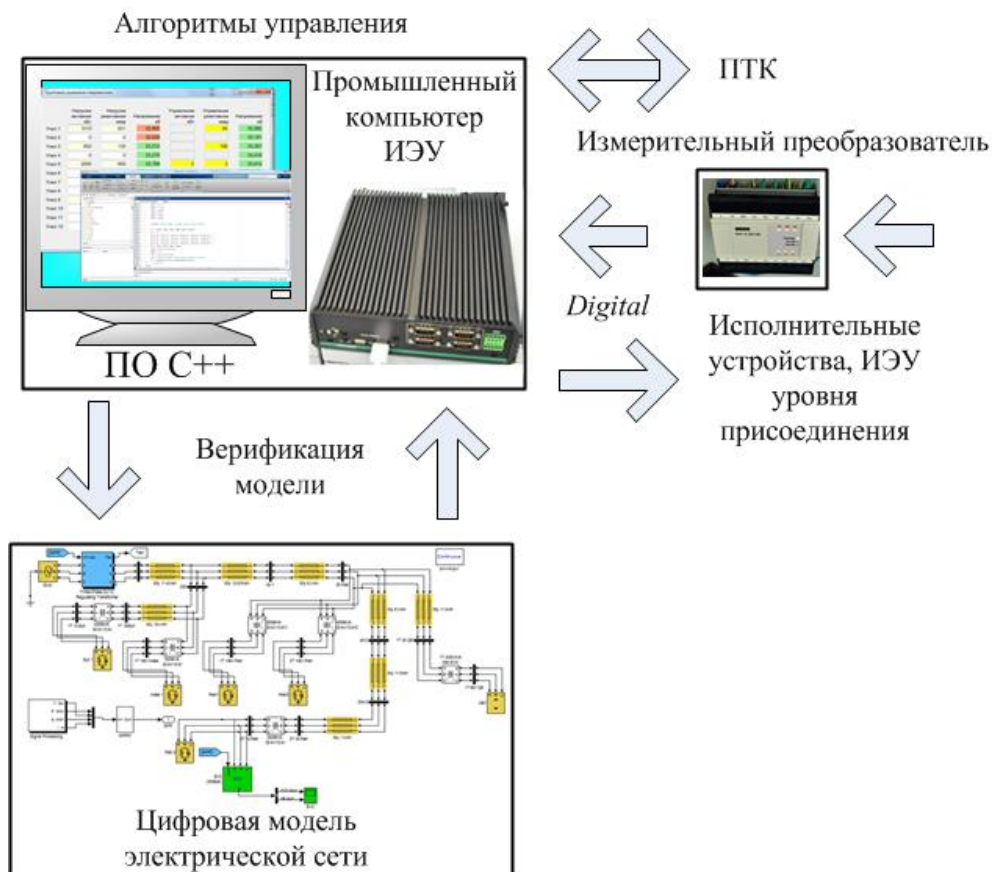
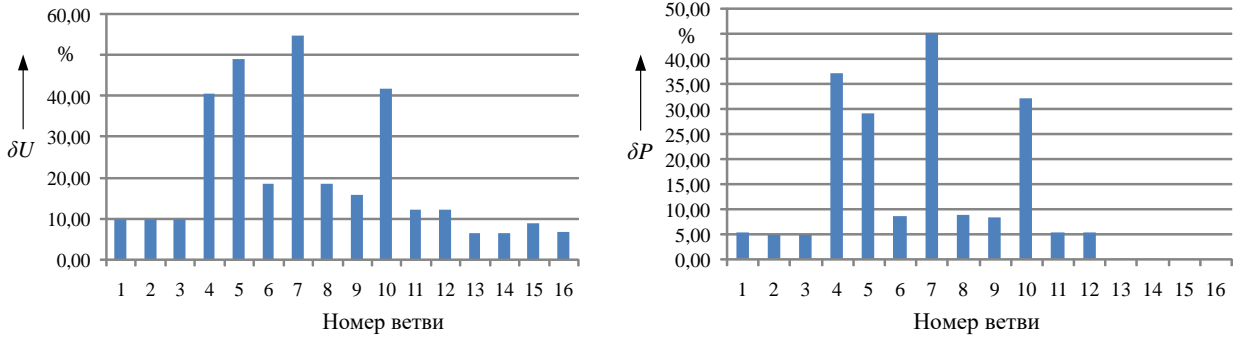


Рис. 1. Структурная схема работы ИЭУ подстанционного уровня

В качестве исходных данных расчета задавалась схема замещения системы электроснабжения из 16 линий (ветвей), значения параметров пассивных элементов, а также значения параметров режима активных элементов, определяемые реальными условиями работы источников и потребителей электроэнергии. Нагрузки задавались статическими характеристиками по напряжению. Локальные агенты задавались тремя состояниями: измерение (Metering), ожидание работы (Waiting), работа (Control). Управляющий контроллер осуществляет координацию работы локальных с учетом прогноза, производственных правил и ограничений по напряжению, предельной мощности и пр. При этом определение величины управляющих воздействий осуществляется в виде приращений активной и реактивной мощности на основе линеаризованных уравнений в полярных координатах через матрицу Якоби на основе координации разнотипных линейных регуляторов напряжения и мощности с учетом технических возможностей их работы (плавное, ступенчатое регулирование и пр.) и влияния внешней системы электроснабжения.

На рис. 2 представлено снижение падения напряжений в линиях и потерь мощности в них относительно локального регулирования за счет автоматического координированного

интеллектуального управления распределенными средствами регулирования напряжения и потоков мощности (устройства компенсации реактивной мощности на шинах 6 и 7, генерации на шине 3 и накопления на шине 4).



**Рис. 2.** Снижение падения напряжения в линиях и потерь мощности в них

Для снижения перегрузки, повышения пропускной способности реализован перспективный подход к реконфигурации системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог на основе решения задач оптимизации нормальных режимов (статическая реконфигурация) и минимизации потребления электроэнергии без расчета установившихся режимов в темпе процессов изменения спроса на электроэнергию (динамическая реконфигурация). В качестве критерия оптимизации топологии электрической сети выступает минимальное потребление электроэнергии при эксплуатационных ограничениях по схемам электроснабжения, допустимым параметрам режима, перегрузкам линий и прочее.

Оптимизационная задача динамической реконфигурации имеет вид:

$$\sum_{k=1}^N P_k(\delta_{ij}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\delta_{ij}=0,1 (i, j) \in E$$

при ограничениях:

$$\sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \in N_3}} P_{ij} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \in N_4}} P_{ji} \begin{cases} \leq P_i^{\text{ист}}, i \in N_{1'}, N_{2'}, N_{3'}, N_{4'}; \\ \leq -(P_{Hj} - P_{Tj}), j \in N_H; \end{cases}$$

$$\sum_{i=j} P_j^{\text{ист}} > \sum_{i=j} (P_{Hj} - P_{Tj}), \Delta P_{ij} = 0; 0 \leq P_{ij} < P_{ij}^{\text{max}}; 0 \leq Q_{ij} < Q_{ij}^{\text{max}}; \quad (2)$$

$$U_j^{\text{min}} \leq U_j < U_j^{\text{max}}; \sum_{i \neq j} \delta_{ij} = a, a = 1, \dots, n.$$

Модель потоков мощности для радиальной электрической сети (рис. 3) может быть представлена в виде:

$$P = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (P_{Hj} - P_{Tj}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta P_{ij}); \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (Q_{Hj} - Q_{Tj}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N(i)} \delta_{ij} (\Delta Q_{ij}),$$

где  $P_{Hj}, P_{Tj}$  и  $Q_{Hj}, Q_{Tj}$  – активные и реактивные мощности нагрузки и инъекции (от источников энергии) на шине  $j$ ;  $\Delta P_{ij}, \Delta Q_{ij}$  – потери активной и реактивной мощности в линиях  $ij$ ;  $P_{ij}, Q_{ij}$  – потоки активной и реактивной мощности в линиях  $ij$ ;  $r_{ij}, x_{ij}$  – активные и индуктивные сопротивления линий  $ij$ ;  $\delta_{ij}$  – двоичная переменная ( $\delta_{ij} = 0,1 (i, j) \in E$ ).

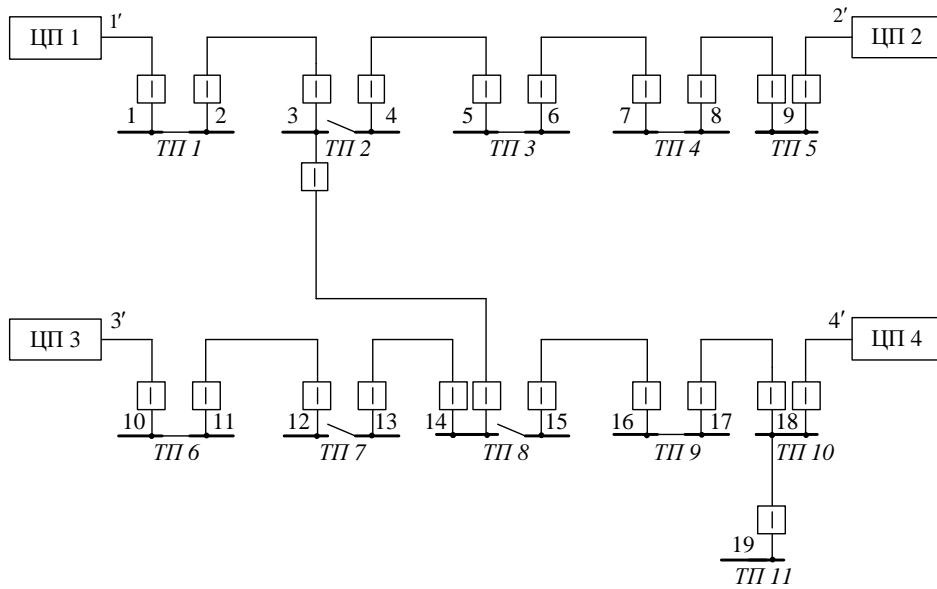
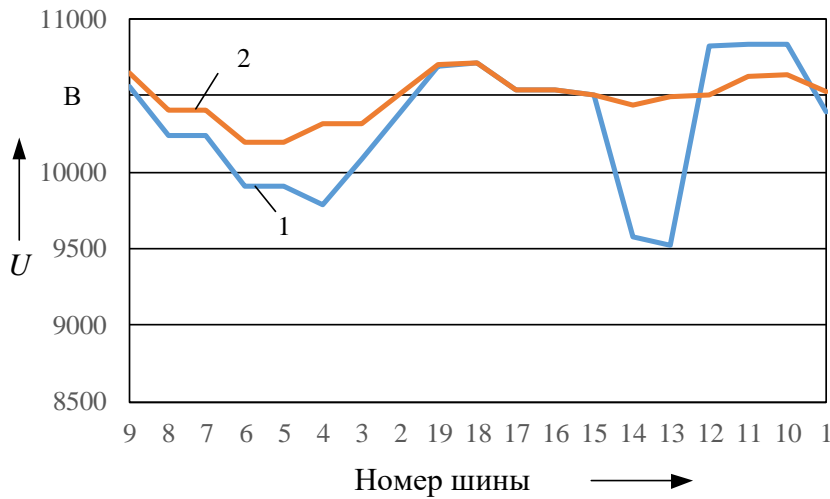
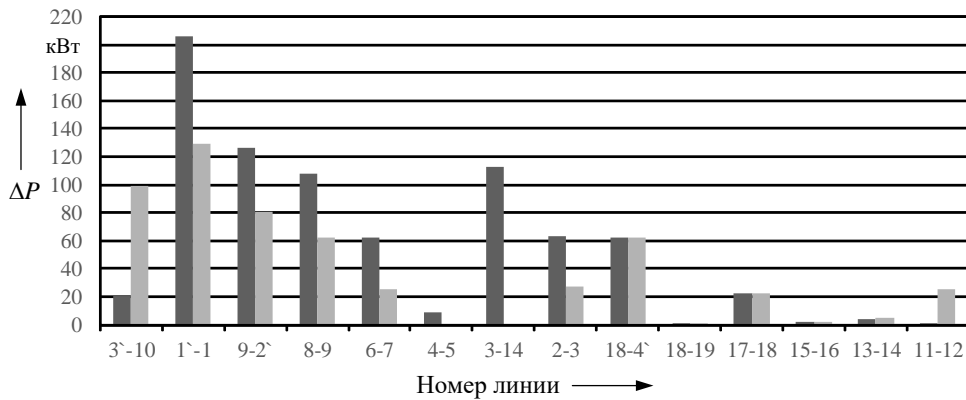


Рис. 3. Расчетная электрическая схема

На рис. 4 представлены результаты реализации представленного подхода при динамической реконфигурации: исходное состояние –  $\delta_{34} = \delta_{1213} = \delta_{1415} = 0$ , после реконфигурации –  $\delta_{45} = \delta_{314} = \delta_{1415} = 0$ .



а



б

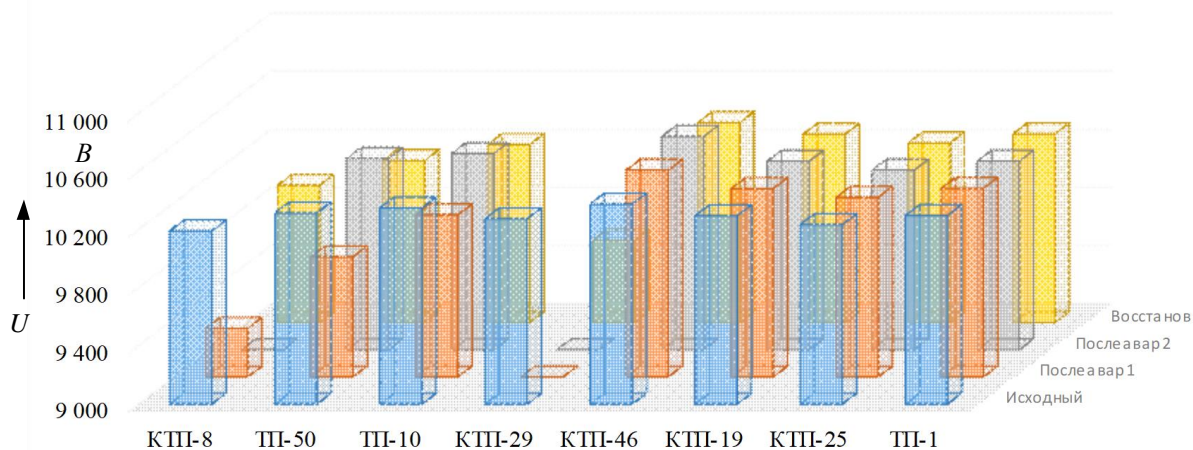
Рис. 4. Напряжение на шинах до (линия 1) и после (линия 2) реконфигурации (а), потери активной мощности (б) до (левый столбец) и после (правый) реконфигурации

В рамках самовосстанавливающихся систем электроснабжения стационарных потребителей железных дорог предложен подход на основе решения задачи целочисленного линейного программирования с минимальными потерями мощности без расчета установившихся режимов на основе агентного подхода с ограничением мощности нагрузок/активных потребителей. В данном случае предлагается даже при отсутствии генерации, работающей параллельно с сетью, в качестве принципа работы автоматического включения резерва осуществлять подключение обесточенного участка к другому источнику, не нарушая баланс мощности на втором источнике, путем опережающего деления-реконфигурации схемы его питания (рис. 5).



**Рис. 5. Алгоритм автоматического восстановления нормального режима в электрических сетях железных дорог**

На рисунке 6 представлены полученные результаты имитационного моделирования реализации представленного алгоритма для различных схем электроснабжения на примере напряжений для исходного, послеаварийного 1 и 2, восстановленного режима.



**Рис. 6. Напряжения в узлах электрической схемы в различных режимах**

Реализация интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог связана прежде всего с повышением наблюдаемости, управляемости, автоматизации и диагностики энергообъектов, развитием информационно-управляющих систем, цифровизации бизнес-процессов при передаче и распределении электроэнергии [15].

Основные текущие и перспективные проекты по цифровизации системы электроснабжения железных дорог заключаются в дистанционном управлении оборудованием подстанций, мониторинге нормальных и аварийных режимов, автоматическом управлении параметрами энергообъектами, цифровом моделировании на основе CIM моделей, внедрении системы ТО и ТР на основе диагностики состояния электрооборудования, в ценозависимом энергопотреблении (управлении спросом) и др.

Технические эффекты от внедрения интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог при электроснабжении стационарных потребителей на основе ряда представленных выше подходов и результатов моделирования представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Технические эффекты и способы их достижения**

Технический эффект	Способы достижения / технологические процессы	Эффект
1	2	3
Снижение потерь мощности (электроэнергии)	Повышение уровня наблюдаемости и управляемости сети.	23 %
Повышение качества электроэнергии (по напряжению)	Автоматическое управление электросетевыми контроллерами (просьюмерами) электрической сети координированно с генерацией/потреблением активной и реактивной мощности, работой линейных регуляторов параметров режима.	14 %
Повышение пропускной способности	Реконфигурация электрической сети в автоматическом режиме	41 %



1	2	3
Повышение надежности электроснабжения	<p>Снижение средней суммарной длительности устойчивых отключений на одного потребителя в год (SAIDI).</p> <p>Снижение средней частоты устойчивых отключений на одного потребителя в год (SAIFI).</p> <p>Сокращение поездо-часов задержек по вине хозяйства электроснабжения</p> <p>Сокращение отказов технических средств, времени ликвидации технологических нарушений (аварий).</p> <p>Оперативно-технологическое и ситуационное управление</p> <p>Обеспечение баланса мощности и автоматического восстановления нормального режима.</p>	7 % (оценка)
Сокращение затрат на содержание энергетической инфраструктуры	<p>Повышение уровня автоматизации и дистанционного мониторинга состояния оборудования и процессов.</p> <p>Существенное снижение CAPEX и OPEX за счет сбора данных от удаленных объектов и устройств в электрической сети, автоматизированной обработки массивов данных анализа неисправностей, планирования и контроля ТО и ТР и прочего в рамках задач онлайн и офлайн систем поддержки принятия решений на основе разработанных математических алгоритмов.</p> <p>Повышение производительности труда (снижение трудозатрат на обслуживание условной единицы оборудования)</p>	до 20 % (оценка)

Полученные результаты имитационного моделирования позволили для расчетного участка электрической сети дистанции электроснабжения определить значения технического эффекта по снижению потерь мощности, повышению качества электроэнергии (по медленному изменению напряжения), представленные в таблице 1.

Оценка технических эффектов, связанных с повышением надежности электроснабжения и сокращением затрат на содержание энергетической инфраструктуры, выполнена в соответствии с действующими методиками ОАО «РЖД», СТО и инструкциями [16-18], принимая удельный ущерб 99 руб./кВт·ч в ценах 2018 г. (табл. 3 СТО 56947007-29.240.01.271-219) от недоотпуска электроэнергии в объеме 2,3 %.

В качестве измерителя при оценке сокращения затрат на содержание энергетической инфраструктуры принималось [19]: протяженность воздушных и кабельных линий электропередач, количество подстанций, объем отпуска электроэнергии в сеть по уровням напряжений, уровень фактических потерь электроэнергии.

Уровень капитальных затрат для модернизации системы электроснабжения железных дорог, необходимый для перехода к автоматическому распределенному управлению в реальном времени на основе самоорганизующихся интеллектуальных распределенных систем накопления, генерации, передачи и потребления электроэнергии (управление

спросом) путем их оптимальной координации, зависит от уровня цифровизации и определяется сметной документацией [20].

### **Заключение**

Результаты исследований показали техническую эффективность представленных алгоритмов информационно-управляющих систем координированного управления напряжением, потоками мощности, реконфигурацией, восстановлением нормального режима в электрических сетях стационарных потребителей железных дорог.

Ожидаемое повышение надежности электроснабжения (сокращение отказов технических средств, среднее число отключений) составляет 7 %, снижение потерь мощности – 23 %, повышение пропускной способности – до 41 %, сокращение затрат на содержание энергетической инфраструктуры – 12 %. Срок окупаемости по экспертным оценкам составит менее 6 лет при условии цифровизации тяговых и трансформаторных подстанций железных дорог.

Интеллектуальная энергетическая инфраструктура, основанная на адаптивном управлении режимами работы силового оборудования, в том числе устройствами регулирования напряжения, реактивной мощности, FACTS, накопителями, распределенной генерации, электроподвижного состава, позволит обеспечить достижение целевых показателей надежности, экономичности, пропускной способности системы электроснабжения железных дорог.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Furukakoi M. Multi-objective optimal operation with demand management and voltage stability // 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE. 2017. pp. 383–388.
2. Законьшек Я., Шамис М., Баламут В. Симуляторы RTDS для моделирования и исследования современных энергосистем в реальном масштабе времени // Электрические сети и системы. 2016. № 4. С. 12–19.
3. Ordehi A.R. Optimisation of demand response in electric power systems, a review // Renewable and sustainable energy reviews. 2019. vol. 103. pp. 308–319.
4. Tretyakov E.A. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. vol. 643. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012005.
5. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга).
6. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2020 № 466-р).
7. Jizhong Z. Optimization of power system operation. Piscataway: IEEE Press. 2009. 624 p.
8. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. М.: НТЦ ФСК ЕЭС. 2012. 51 с.
9. Morales D. Optimal location of voltage regulators // IEEE Trans. On Power Systems. 2007. vol. 12. pp. 27–29.
10. Крюков А.В., Закарюкин В.П. и др. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог: монография / под ред. А.В. Крюкова. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 129 с.
11. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 30–45.
12. Arefi A., Abeygunawardana A., Ledwich G. A new risk-managed planning of electric distribution network incorporating customer engagement and temporary solutions // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2018. vol. 7 (4). pp. 1646–1661.

13. Черемисин В. Т., Третьяков Е. А. Совершенствование методов и средств управления транспортом и распределением электроэнергии в системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог: монография. Омск. 2017. 187 С.
14. Групповое управление напряжением в электроэнергетических системах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666735. Заявл. 05.12.2019; опубл 13.12.2019. В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков, А. А. Лаврухин.
15. Cheremisin V., Tretyakov E. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways // MATEC Web of Conferences. 2018. vol. 239, 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201823901011.
16. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте // Приложение к указанию МПС России от 31.08.1998 г. № в-1024у. М.: МПС, 1998.
17. СТО РЖД 08.005-2011. Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок оценки эффективности инновационных проектов». Стандарт ОАО «РЖД» (Дата введения: 01.07.2012).
18. СТО 56947007-29.240.01.271-219. Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. Эталоны обоснований. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» (дата введения 24.07.2019).
19. Методика расчета и подтверждения экономического эффекта от использования результатов научно-технических работ в деятельности ОАО «РЖД» по кругу ведения Департамента электрификации и электроснабжения (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2008 №2889р).
20. Отраслевая сметно-нормативная база ОСНБЖ-2001 (ОПДС-2821.2011).

## REFERENCES

1. Furukakoi M. Multi-objective optimal operation with demand management and voltage stability. *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE*, 2017. pp. 383–388.
2. Zakon'shek YA., SHamis M., Balamut V. Simulyatory RTDS dlya modelirovaniya i issledovaniya sovremennyh energosistem v real'nom masshtabe vremeni [RTDS simulators for real-time simulation and research of modern power systems]. *Elektricheskie seti i sistemy [Electrical networks and systems]*, 2016, No. 4, pp. 12–19.
3. Ordehi A.R. Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2019, No. 103, pp. 308–319.
4. Tretyakov E.A. Coordinated control of active and reactive capacity generation in electrical power distribution networks of railways. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, No. 643. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012005.
5. Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya holdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga) [The strategy of scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future until 2030 (White Book)].
6. Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «RZHD» do 2025 goda (utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19.03.2020 № 466-r) [Long-term development program of Russian Railways until 2025 (approved by the order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2020 No. 466-r)].
7. Jizhong Z. Optimization of power system operation. *Piscataway: IEEE Press*, 2009, 624 p.
8. Koncepciya intellektual'noj elektroenergeticheskoy sistemy s aktivno-adaptivnoj set'yu. [The concept of an intelligent power system with an active-adaptive grid], Moscow: NTC FGC UES. 2012, 51 p.
9. Morales D. Optimal location of voltage regulators. *IEEE Trans. On Power Systems*, 2007, No. 12, pp. 27–29.

10. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Operativnoe upravlenie v sistemah elektrosnabzheniya zheleznyh dorog: monografiya [Operational management in power supply systems of railways: monograph], Irkutsk: IrGUPS, 2012, 129 p.
11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya nastrojki avtomaticheskikh regulyatorov ustano-vok raspredelennoj generacii [Application of genetic algorithms for tuning automatic regulators of distributed generation plants]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]*, 2016, No. 2, pp. 30–45.
12. Arefi A., Abeygunawardana A., Ledwich G. A new risk-managed planning of electric distribution network incorporating customer engagement and temporary solutions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018. No. 7 (4), pp. 1646–1661.
13. Cheremisin V. T., Tretyakov E. A. Sovershenstvovanie metodov i sredstv upravleniya trans-portom i raspredeleniem elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya stacionarnykh potrebitel'ej zheleznyh dorog: monografiya [Improvement of methods and means of control of transport and distribution of electricity in power supply systems of stationary consumers of railways: monograph], Omsk, 2017, 187 p.
14. Cheremisin V.T., Tretyakov E.A., Lavrukhin A.A. Gruppovoe upravlenie napryazheniem v elektroenergeticheskikh sistemah [Group voltage control in electric power systems]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM [Certificate of state registration of a computer program]*, No. 2019666735. Appl. 05.12.2019; published 12/13/2019.
15. Cheremisin V., Tretyakov E. Implementation of the method of adaptive management of electric power transmission in distribution electric networks of railways. *MATEC Web of Conferences*, 2018, No. 239, 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201823901011.
16. Metodicheskie rekomendacii po ocenke investicionnykh proektov na zheleznodorozh-nom transporte [Methodological recommendations for the assessment of investment projects in railway transport]. *Prilozhenie k ukazaniyu MPS Rossii [Appendix to the instruction of the Ministry of Railways of Russia]*, 31.08.1998, № В-1024у. Moscow: MPS, 1998.
17. STO RZD 08.005-2011. Innovacionnaya deyatel'nost' v OAO «RZHD». Poryadok ocenki effektivnosti innovacionnykh proektov» [Innovative activities at Russian Railways. The procedure for assessing the effectiveness of innovative projects]. *Standart OAO «RZHD» [Russian Railways Standard]*, (Date of introduction: 01.07.2012).
18. STO 56947007-29.240.01.271-219. Metodicheskie ukazaniya po tekhniko-ekonomicheskomu obos-novaniyu elektrosetevykh ob"ektov. Etalony obosnovanij [Guidelines for the feasibility study of power grid facilities. Justification standards]. *Standart organizacii PAO «FSK EES» [Organization standard of PJSC FGC UES]*, (date of introduction 07.24.2019).
19. Metodika rascheta i podtverzhdeniya ekonomicheskogo effekta ot ispol'zovaniya rezul'tatov nauchno-tekhnicheskikh rabot v deyatel'nosti OAO «RZHD» po krugu vedeniya Departamenta elektrifikacii i elektrosnabzheniya [Methodology for calculating and confirming the economic effect from the use of the results of scientific and technical work in the activities of JSCo Russian Railways within the terms of reference of the Department of Electrification and Power Supply] (approved by order of JSCo Russian Railways No. 2889r dated 30.12.2008).
20. OTRASLEVAYA smetno-normativnaya baza OSNBZH-2001 (OPDS-2821.2011) [Sectoral estimate and normative base OSNBZH-2001].

### Информация об авторах

Третьяков Евгений Александрович - к. т. н., доцент, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: eugentr@mail.ru

Черемисин Василий Титович - д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

### **Authors**

*Evgeny Alexandrovich Tretyakov*– Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Rolling Stock of Electric Railways», Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: korneyev@omgtu.ru

*Vasily Titovich Cheremisin*– Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department «Rolling stock of electric railways», Omsk State Transport University, Omsk

### **Для цитирования**

Третьяков Е. А. Оценка эффективности внедрения интеллектуальной энергетической инфраструктуры железных дорог при электроснабжении стационарных потребителей [Электронный ресурс] / Е. А. Третьяков, В. Т. Черемисин // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 4(10). – Режим доступа: <http://mnv.irkgups.ru/toma/410-20>, свободный.– Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 10.11.2020)

### **For citation**

Tretyakov E. A., Cheremisin V. T. *Ocenka effektivnosti vnedreniya intellektual'noj energeticheskoj infrastruktury zheleznyh dorog pri elektrosnabzhenii stacionarnyh potrebitelej* [Evaluation of the effectiveness of the implementation of intelligent energy infrastructure of railways when supplying stationary consumers]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal] - 2020. - No. 4(10). - Access mode: <http://mnv.irkgups.ru/toma/410-20>, free. - Zagl. from the screen. - Yaz. Russian, English (date of the application: 10.11.2020)