

Управление электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог

И.Н. Денисов, Е.А. Третьяков✉

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

✉eugentr@mail.ru

Резюме

Развитие цифровых технологий на железнодорожном транспорте позволяет преодолеть ряд технологических барьеров, связанных с ограничением пропускной способности энергетической инфраструктуры посредством управления электроподвижным составом исходя из режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог в реальном времени. В статье предложен алгоритм управления электроподвижным составом за счет изменения потребляемой мощности с учетом режимов работы и ограничений координированно с регуляторами системы тягового электроснабжения железных дорог в реальном времени. Управляющие воздействия на снижение мощности электротяговой нагрузки могут быть получены путем численного моделирования на основе расчетной схемы или прямого решения системы уравнений, описывающих токи и напряжения в межподстанционной зоне системы тягового электроснабжения. В результате расчетов для одного момента времени получена величина снижения мощности электротяговой нагрузки в контексте приоритета для выполнения ограничений по загрузке фидеров контактной сети по току и обеспечения напряжений в тяговой сети в допустимых пределах. Достоверность итогов моделирования подтверждается сходимостью полученных результатов расчета режимов электрифицированного участка и экспериментальных данных. Реализация предлагаемого подхода позволит повысить пропускную способность электрифицированного участка за счет повышения надежности электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения железных дорог из-за исключения ненормальных режимов их работы. Представленная технология определения управляющих воздействий для электроподвижного состава с учетом взаимной координации и приоритета при превышении допустимых пределов параметров энергетической инфраструктуры практически осуществима и может применяться в рамках «виртуальной сцепки».

Ключевые слова

электроподвижной состав, система тягового электроснабжения, управление спросом, пропускная способность, режимы работы, мгновенная нагрузка

Для цитирования

Денисов И.Н. Управление электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог / И.Н. Денисов, Е.А. Третьяков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 3 (83). С. 10–19. DOI 10.26731/1813-9108.2024.3(83).10-19.

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.04.2024 г.; поступила после рецензирования: 04.09.2024 г.; принята к публикации: 05.09.2024 г.

Control of electric rolling stock taking into account operation modes of railway traction power supply system

I.N. Denisov, E.A. Tret'yakov✉

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

✉eugentr@mail.ru

Abstract

The development of digital technologies in railway transport makes it possible to overcome a number of technological barriers associated with the limited capacity of the energy infrastructure by controlling electric rolling stock taking into account the operating modes of the railway traction power supply system in real time. The paper proposes an algorithm for controlling electric rolling stock in terms of changing the consumed power taking into account the operating modes, restrictions and in coordination with the regulators of the railway traction power supply system in real time. Control influence on the power reduction of the electric traction load can be obtained by numerical modeling based on a calculation scheme or a direct solution to a system of equations describing currents and voltages in the inter-substation zone of the traction power supply system. As a result of calculations for a single point in time, the value of the reduction in the power of the electric traction load was obtained taking into account the priority for fulfilling restrictions on the loading of contact network feeders by current and ensuring voltages in the traction network within acceptable limits. The reliability of the modeling results is confirmed by the convergence of the obtained results of calculating the modes of the electrified section with the experimental data. The implementation of the proposed approach will increase the capacity of the electrified section by increasing the reliability of the electric rolling stock and the traction power supply.

ply system of the railways due to the exclusion of abnormal modes of their operation. The presented technology for determining control actions for electric rolling stock taking into account mutual coordination and priority when exceeding the permissible limits of the parameters of the energy infrastructure is practically feasible and can be used within the framework of the «virtual coupling».

Keywords

electric rolling stock, traction power supply system, demand management, bandwidth, operating modes, instant loading

For citation

Denisov I.N., Tret'yakov E.A. Upravlenie elektropodvizhnym sostavom s uchetom rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog [Control of electric rolling stock taking into account operation modes of railway traction power supply system]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 3(83), pp. 10–19. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.3(83).10-19.

Article Info

Received: April 15, 2024; Revised: September 4, 2024; Accepted: September 5, 2024.

Введение

Развитие цифровых технологий на железнодорожном транспорте позволяет создать возможность преодоления ряда технологических барьеров, связанных с ограничением пропускной способности энергетической инфраструктуры за счет управления электроподвижным составом (ЭПС) с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог в реальном времени.

В настоящее время график движения поездов формируется на основе тяговых расчетов [1] по требованиям ГОСТ 57670-2017 [2]. При этом не принимаются во внимание фактические параметры режимов СТЭ, например мгновенные значения токов в тяговой сети, загрузка силовых трансформаторов и преобразователей тяговых подстанций, напряжения на токоприемнике ЭПС и ряд других. Аналогично не учитываются фактические токи, мощности ЭПС в реальных условиях эксплуатации. Отсутствует координация между соседними поездами по электрическим параметрам в условиях ограничений энергетической инфраструктуры. В свою очередь, регуляторы СТЭ не учитывают местоположение ЭПС, режимы их работы для обеспечения функционирования транспортного комплекса как единой кибернетической системы.

Реализация технологии «виртуальная сцепка» [3–5] может в ряде случаев ограничиваться возможностью выхода токов и напряжений в тяговой сети за допустимые пределы, особенно когда отсутствует их мониторинг в реальном времени.

Согласно Стратегии научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г. [6], перспективными технологиями являются автоматическое опре-

деление ограничений по потребляемой мощности с учетом складывающейся поездной обстановки на основе проведения оценочных тяговых расчетов в режиме реального времени и поддержки принятия оптимальных решений диспетчерским персоналом по организации пропуска поездов на участках.

Таким образом, управление ЭПС с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог представляется актуальным, имеет потенциал развития и требует дальнейших научных исследований.

Целью данной работы является обоснование подходов к управлению магистральными электровозами на межподстанционной зоне с учетом ограничений СТЭ.

Основные решаемые задачи:

- выполнить обзор основных публикаций по указанной проблематике;
- предложить алгоритм определения энергетических ограничений для магистральных электровозов с учетом их приоритета в реальном времени;
- выполнить численное моделирование управления магистральными электровозами на межподстанционной зоне с учетом ограничений СТЭ.

В работах [7, 8] авторы предлагают воздействовать на электровоз в сторону уменьшения скорости поезда и увеличения межпоездного интервала для снижения загрузки электрооборудования тяговых подстанций и обеспечения энергосбережения. В целом представленный подход является известным и широко применяется при реализации технологии управления спросом промышленных и бытовых нагрузок в рамках ценозависимого электропотребления [9].

Принципов и методов реализации технологии управления спросом электротяговыми нагрузками с контролем мгновенных значений электрических параметров в реальном времени в опубликованных работах не представлено.

Совместимость параметров режимов ЭПС и регуляторов СТЭ позволит повысить надежность перевозочного процесса, снизить количество неплановых остановок поездов и в полной мере реализовать технологии типа «виртуальная сцепка» по фактическим, а не расчетным условиям эксплуатации.

Управление регуляторами СТЭ с учетом информации о местоположении, тягово-энергетических параметрах ЭПС в реальном времени существенно повысит эффективность их работы. Функционирование устройств релейной защиты системы электроснабжения железных дорог и ЭПС как единой кибернетической системы позволит повысить надежность перевозочного процесса.

Общий порядок реализации предлагаемого подхода к корректировке мощности электротяговых нагрузок и выработке мощности регуляторами энергетической инфраструктуры следующий:

1. Измерение бортовыми системами параметров электровоза (электропоезда), а также

электрических параметров СТЭ, синхронизированное по времени.

2. Расчет коэффициентов влияния электротяговых нагрузок друг на друга и на систему электроснабжения железных дорог.

3. Определение управляющих воздействий для ЭПС и регуляторов СТЭ в части приращений активной / реактивной мощности; перерасчет указанных управляющих воздействий в необходимый режим (тяга, торможение, выбег), позицию, силу тяги / торможения, которые соответствуют заданным ограничениям энергетической инфраструктуры.

4. Преобразование указанных воздействий в откорректированные графики движения поездов (ограничения движения) и их передача на бортовые системы ЭПС для исполнения в реальном времени.

Структурная схема взаимодействия элементов транспортной системы как единое целое представлена на рис. 1.

Обработку данных измерений ЭПС и оценку влияния на СТЭ целесообразно выполнять бортовыми вычислительными средствами, что сократит объем передаваемой информации. Расчет управляющих воздействий на ЭПС и регуляторы СТЭ выполняется в центре управления движением поездов.

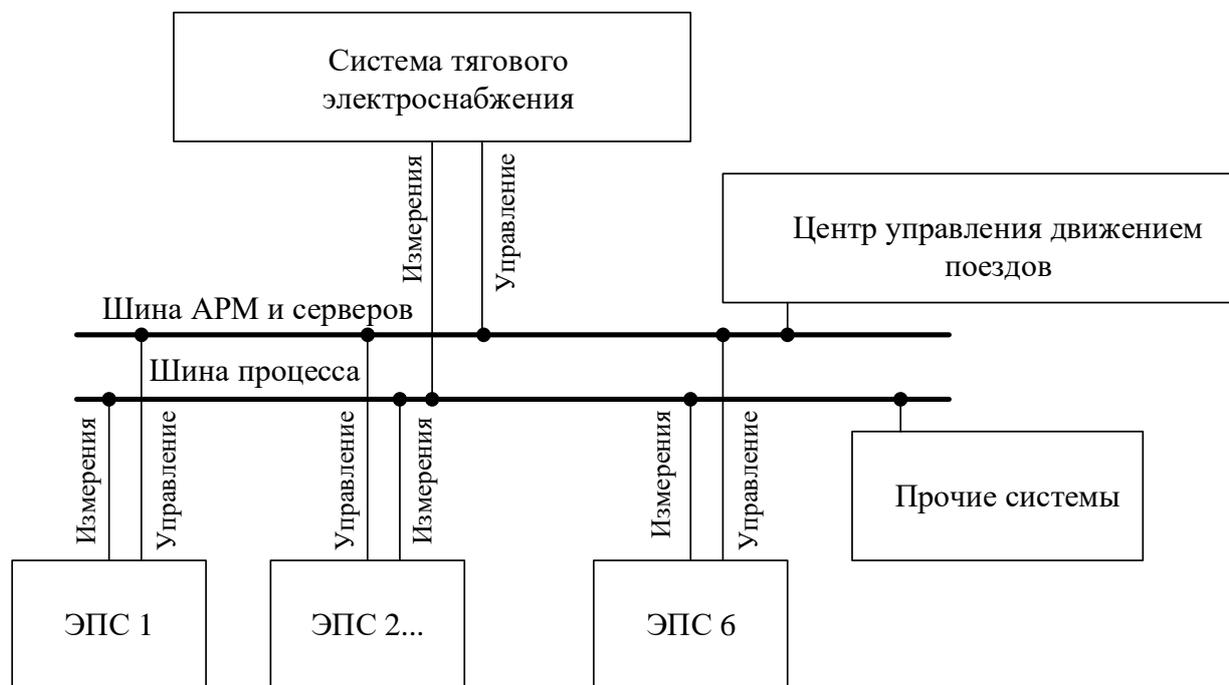


Рис. 1. Блок-схема информационных потоков при управлении электроподвижным составом

Fig. 1. Block diagram of information flows while controlling of electric rolling stock

В перспективе информационно-управляющая система должна управлять электротяговыми нагрузками и регуляторами системы электроснабжения железных дорог (регуляторы напряжения, устройств компенсации реактивной мощности, накопителей, секционирования контактной сети) как единой транспортной системой, во взаимосвязи. Координированное управление всеми регуляторами и ЭПС представляет собой в достаточной степени сложную научно-техническую задачу.

Предлагаемый алгоритм управления электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения

железных дорог в реальном времени представлен на рис. 2.

Расчет влияния по электрическим параметрам ЭПС друг на друга и на систему электроснабжения железных дорог в границах рассматриваемого участка осуществляется на основе математической модели системы электроснабжения железных дорог с электротяговыми нагрузками.

Напряжение независимых узлов в схеме замещения определяются по выражению:

$$U_i = Y_{ij}^{-1} (I_i - M_j Y_p) E_p,$$

где Y_{ij} – матрица узловых проводимостей, См;

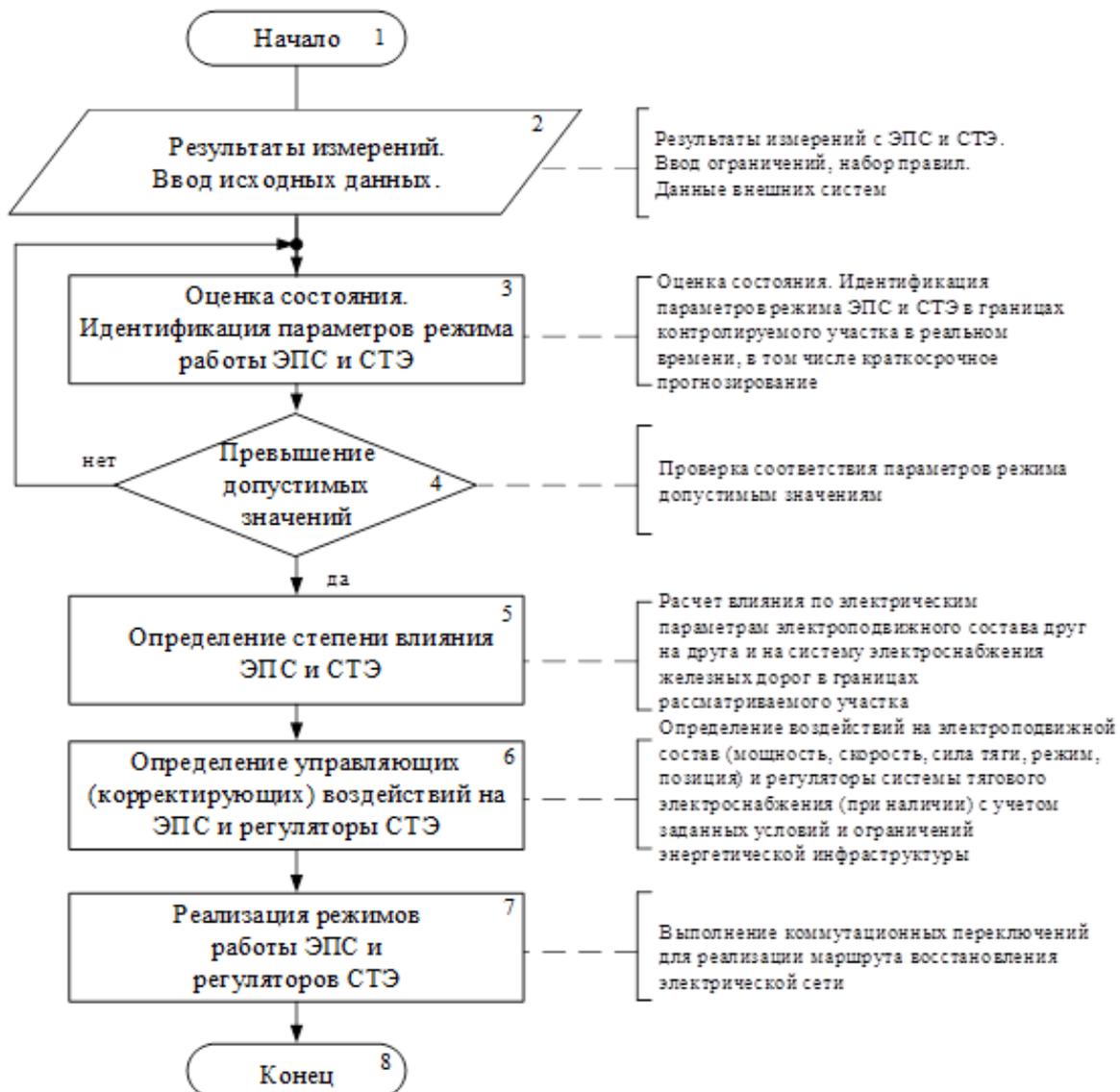


Рис. 2. Алгоритм управления электроподвижным составом с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения железных дорог в реальном времени

Fig. 2. Algorithm for controlling electric rolling stock taking into account the operating modes of the traction power supply system of railways in real time

I_i – столбец заданных токов в узлах, А; M_j – матрица соединений; Y_p – матрица проводимостей ветвей, См; E_p – столбец заданных ЭДС ветвей, В [10].

В нелинейной форме параметры электрической сети могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} U_i \sum_{j=0}^{n-1} Y_{ij} U_j \cos(\delta_i - \delta_j - \psi_{ij}) = P_i; \\ U_i \sum_{j=0}^{n-1} Y_{ij} U_j \sin(\delta_i - \delta_j - \psi_{ij}) = Q_i, \end{cases}$$

где δ_i , δ_j , ψ_{ij} – углы комплексного напряжения [10].

Расчетная схема замещения межподстанционной зоны СТЭ 25 кВ представлена на рис. 3. Электротяговая нагрузка задается в виде полных мощностей $S_i = P_i + Q_i$.

На схеме замещения показаны собственные сопротивления эквивалентных контактных сетей путей и питающих проводов Z_1, Z_2, \dots, Z_{20} [2].

Влияние электротяговых нагрузок друг на друга и СТЭ может быть выполнена на основе сенсорного анализа [11, 12] путем применения метода приращений. Указанное влияние в рамках решаемых задач оценивается по напряжению и полному току в элементах расчетной схемы.

Коэффициент влияния j -й электротяговой нагрузки на напряжение в i -м узле при дис-

кретных мгновенных измерениях действующих значений, В/кВ · А:

$$K_{U_{ij}} = \frac{\Delta U_i}{\Delta S_j},$$

где ΔU_i – приращение напряжения в i -м узле, обусловленное малым приращением нагрузки ΔS_j .

Коэффициент влияния j -й электротяговой нагрузки на ток в p -й ветви расчетной схемы замещения, А/кВ · А:

$$K_{I_{pj}} = \frac{\Delta I_p}{\Delta S_j},$$

где ΔI_p – приращение тока в p -й ветви, обусловленное малым приращением нагрузки ΔS_j .

Указанные приращения могут быть получены путем численного моделирования на основе расчетной схемы или прямого решения системы уравнений, описывающих токи и напряжения в межподстанционной зоне СТЭ.

С участием авторов проведен эксперимент на железной дороге переменного тока с фиксацией синхронизированных измерений электрических параметров двух электровозов и фидеров тяговых подстанций, питающих межподстанционную зону двухпутного участка.

Достоверность полученных результатов подтверждается верификацией математической модели и данных измерений. Фактическая

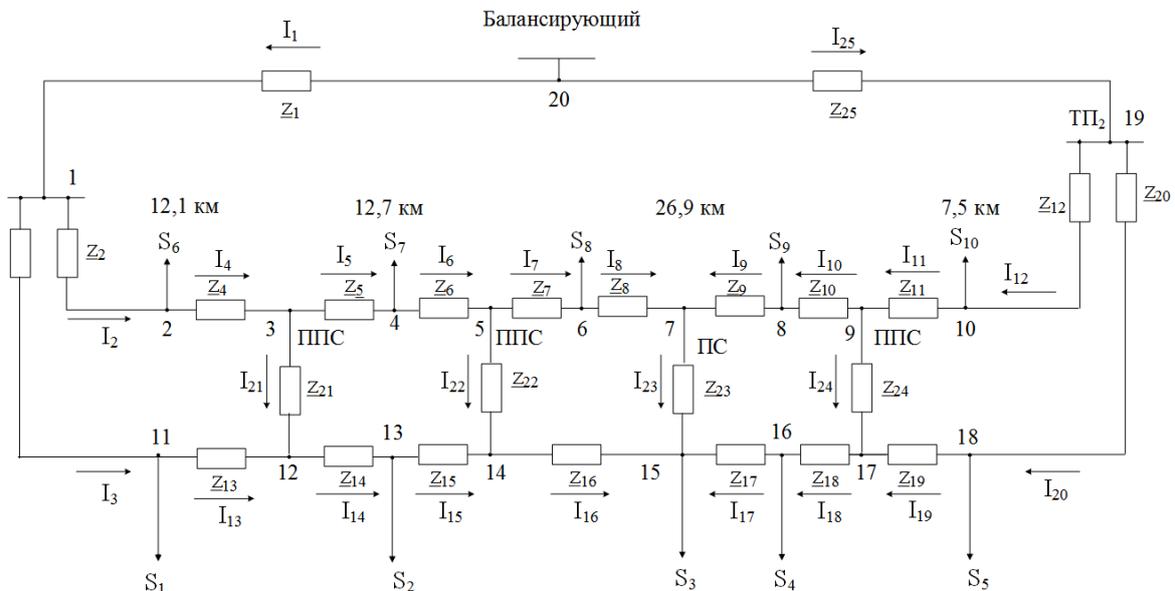


Рис. 3. Мгновенная расчетная схема замещения межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения 25 кВ

Fig. 3. Instantaneous equivalent circuit design of the inter-substation zone of the 25 kV traction power supply system

электротяговая нагрузка задавалась в математическую модель и определялись напряжения в узлах расчетной электрической схемы. Полученные в результате расчета значения напряжений сравнивались с измеренными в реальных условиях. Расхождение не превышало 4 %.

Расчет коэффициентов K_U , K_I осуществляется на основе схемы замещения (см. рис. 3) и реальных электротяговых нагрузок с учетом их местоположения.

В режиме рекуперации указанный коэффициент может принимать отрицательные значения.

На рис. 4 представлены значения коэффициентов K_U , K_I для расчетной мгновенной схемы.

Мощность электротяговой нагрузки складывается из мощности тяговой нагрузки и собственных нужд ЭПС.

В случае ограничений, накладываемых на ЭПС по мощности, необходимо обеспечить заданный режим, позицию, а в некоторых случаях изменение скорости движения поезда, для чего требуется выполнить тяговый расчет с

учетом местоположения поезда на профиле пути с краткосрочным прогнозом. Метод расчета силы тяги, тока, мощности ЭПС при любой позиции регулирования силы тяги, используемый в расчетах, принимался согласно [2].

Математическая модель управления электротяговыми нагрузками с учетом режимов работы СТЭ может быть представлена в виде:

$$\sum_{j=1}^m \Delta S_j (1 - k_{gj}) + \sum_{l=1}^n \Delta S_l (1 - k_{gl}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при ограничениях:

– по напряжению в контактной сети –

$$\sum_{j=1}^m \Delta S_j K_{U_{ij}} + \sum_{l=1}^n \Delta S_l K_{U_{lj}} \geq \Delta U_i, \quad (2)$$

$$\Delta U_i = U_{\text{идоп}} - U_i;$$

– по току линий СТЭ, включая питающие фидера –

$$\sum_{j=1}^m \Delta S_j K_{I_{pj}} + \sum_{l=1}^n \Delta S_l K_{I_{lj}} = \Delta I_p, \quad (3)$$

$$\Delta I_p = I_p - I_{\text{рдоп}};$$

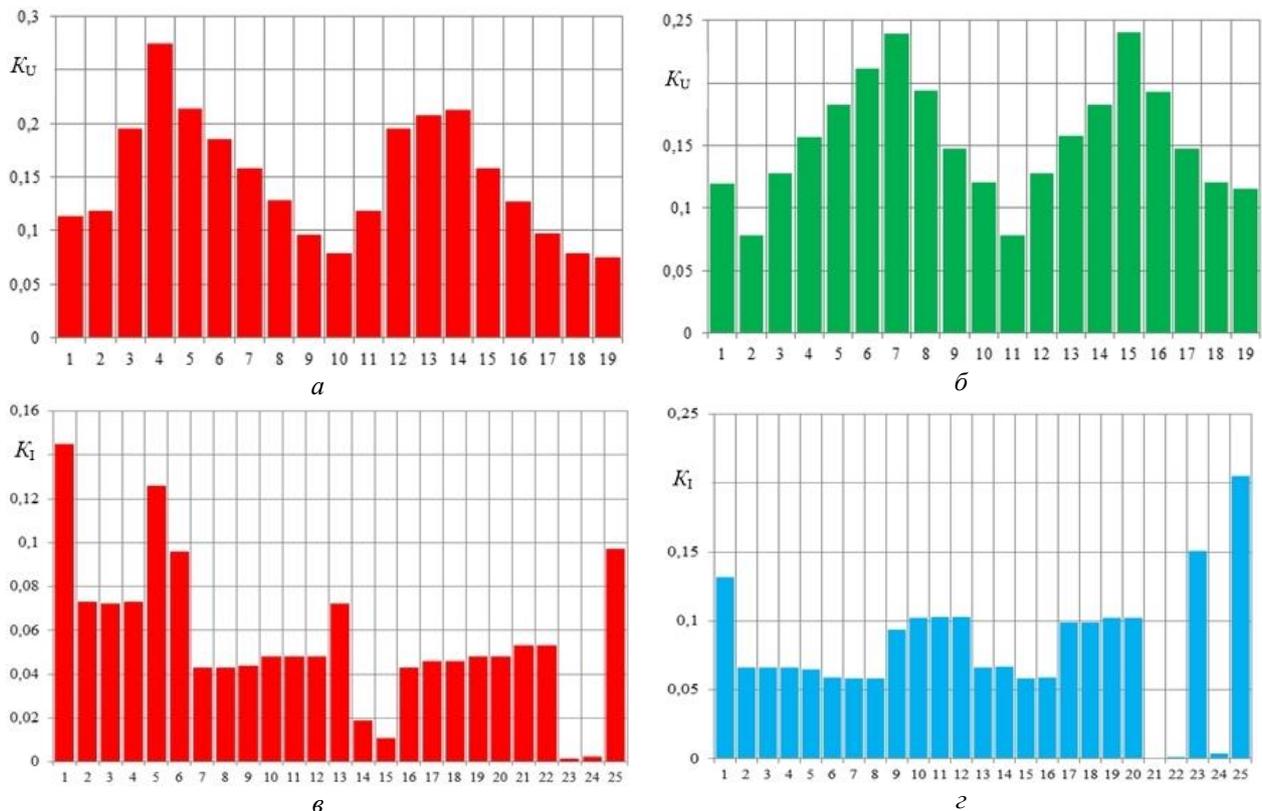


Рис. 4. Коэффициенты влияния K_U , K_I :
 а, в – при изменении нагрузки S_7 ; б, з – при изменении нагрузки S_4

Fig. 4. Influence coefficients K_U , K_I :
 а, в – with the load changes S_7 ; б, з – with the load changes S_4

– прочие:

$$\Delta S_l \leq \Delta S_{l\max}; 0 < \Delta S_j \leq S_j;$$

$$k_{gj}, k_{gl}, K_{Uij}, K_{Ulj}, K_{Ipj}, K_{Iij} \in (0, 1).$$

$$\Delta S_l \leq \Delta S_{l\max}; 0 < \Delta S_j \leq S_j;$$

$$k_{gj}, k_{gl}, K_{Uij}, K_{Ulj}, K_{Ipj}, K_{Iij} \in (0 \dots 1).$$

где ΔS_j – приращение (снижение) j -й электротяговой нагрузки (без учета рекуперации); ΔS_l – приращение мощности l -го регулятора СТЭ (при наличии); k_{gj}, k_{gl} – коэффициент приоритета для электроподвижного состава и регуляторов СТЭ.

Согласно представленной оптимизационной модели (1) определяются управляющие воздействия на снижение мощности электротяговых нагрузок и (или) генерацию реактивной и активной (при наличии) мощности регуляторов СТЭ, которые обеспечивают условия исключения перегрузки линий ΔI_p и снижения напряжения в контактной сети ниже допустимого $\Delta U_i = U_{i\text{доп}} - U_i$.

Таким образом, предполагается, что управляющие воздействия на ЭПС и регуляторы СТЭ (при наличии) будут реализовываться только при перегрузке линий (фидеров) или снижении напряжения в контактной сети ниже допустимой или высокой вероятности наступления такой ситуации (на основе краткосрочного прогноза).

Допустимые значения токов и напряжений в СТЭ принимаются по [2] или заданным эксплуатационным условиям.

Задание коэффициентов приоритета позволяет ранжировать важность электротяговых нагрузок в произвольный момент времени, обеспечивая возможность поддержания исходных графиков движения ответственных поездов, напримердвигающихся по технологии «виртуальная сцепка».

Управление электротяговыми нагрузками и регуляторами СТЭ (при наличии) среди прочего [13–15] может быть реализовано с помощью мультиагентной системы управления [16–18], которая позволяет использовать принцип самоорганизации. В изменяющихся условиях поездной обстановки, если часть электротяговой нагрузки не может принять участие в стабилизации напряжения (снижении загрузки), то для выполнения условий (2) и (3), будут задействованы оставшиеся нагрузки (регуляторы), обеспечивая адаптивность управляющей системы, т.е. самоорганизацию.

Как известно [2], допустимые минимальные значения токов на токоприемнике ЭПС в эксплуатационных режимах, а также нормы допустимых перегрузок по току задаются по времени усреднения. Поэтому при расчете прогнозных параметров перегрузок по току или снижения напряжения на токоприемнике ЭПС ниже допустимого в процессе движения поезда, а также для определения реализации управляющих воздействий на ЭПС и регуляторы СТЭ (при наличии) необходимо учитывать время выхода параметров за установленные пределы.

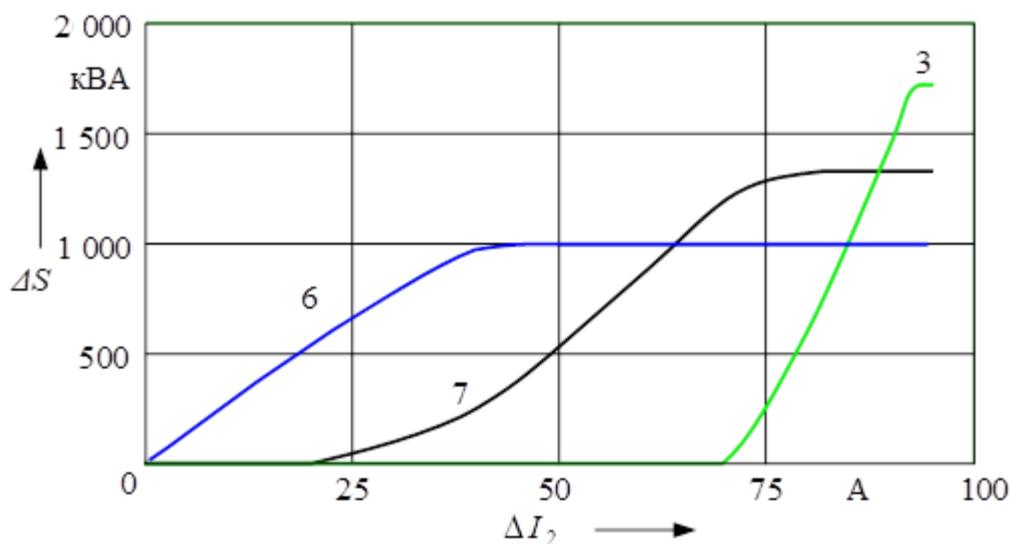


Рис. 5. Расчетные значения снижения мощности электротяговых нагрузок $\Delta S_6, \Delta S_7, \Delta S_3$ с учетом установленных ограничений для снижения перегрузки линии (фидера)

Fig. 5. Estimated values $\Delta S_6, \Delta S_7, \Delta S_3$ for reducing the power of electric traction loads, taking into account the established restrictions to reduce line (feeder) overload

Степень влияния электротяговых нагрузок на параметры режима энергетической инфраструктуры зависит от местоположения электроподвижного состава и изменяется в процессе движения поезда. На рис. 5 представлены расчетные значения снижения мощности электротяговых нагрузок $\Delta S_6, \Delta S_7, \Delta S_3$ с учетом установленных ограничений для снижения перегрузки линии (фидера) ΔI_2 выше допустимых значений в соответствии с условием (3) для одного момента времени расчетной схемы.

Параметры движения поездов, которые подпадают под управление, корректируются на основе расчетного снижения электротяговых нагрузок в конкретный момент времени и последующего тягового расчета режима, силы тяги, позиции ЭПС с учетом предыдущего состояния.

С практической точки зрения для обеспечения максимально возможной пропускной способности электрифицированного участка железной дороги в условиях ограничений СТЭ необходимо брать в расчет реальную поездную обстановку, включая возможность использования потенциальной и кинетической энергий поезда, что учитывается представленными коэффициентами приоритета ЭПС. Также на перегоне в ряде случаев возможно в ограниченных пределах изменять межпоездной интервал (динамически), не снижая пропускную способность участка.

Заключение

Предложен алгоритм управления ЭПС в части изменения потребляемой мощности с учетом режимов работы, ограничений и ко-

ординированно с регуляторами СТЭ в реальном времени.

Управляющие воздействия на снижение мощности электротяговой нагрузки могут быть получены путем численного моделирования на основе расчетной схемы или прямого решения системы уравнений, описывающих токи и напряжения в межподстанционной зоне СТЭ.

В результате расчетов для одного момента времени получена величина снижения мощности электротяговой нагрузки с учетом приоритета для выполнения ограничений по загрузке фидеров контактной сети по току и обеспечению напряжений в тяговой сети в допустимых пределах.

Достоверность результатов моделирования подтверждается сходимостью полученных результатов расчета режимов электрифицированного участка и экспериментальных данных.

Реализация предлагаемого подхода позволит повысить пропускную способность электрифицированного участка за счет повышения надежности ЭПС и СТЭ из-за исключения недопустимых режимов их работы.

Технология определения управляющих воздействий для ЭПС с учетом взаимной координации и приоритета при превышении допустимых пределов параметров энергетической инфраструктуры практически реализуема и может применяться в рамках «виртуальной сцепки».

Координация режимов работы ЭПС и регуляторов СТЭ в рассматриваемом контексте может быть реализована в ближайшем будущем и является актуальной.

Список литературы

1. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 (ред. 05.12.2023). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
2. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. Введ. : 2018–05–01. М. : Стандартинформ, 2017. 52 с.
3. «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне: достигнутые эффекты и направления развития / А.И. Долгий, А.Г. Сахаров, М.А. Дежков и др. // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 5-6 (108-109). С. 15–19.
4. Бушуев С.В., Гундырев К.В., Голочалов Н.С. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 1. С. 1–20.
5. Развитие технологий интервального регулирования движения поездов: итоги и перспективы / В.Е. Андреев, А.В. Пронкин, А.И. Долгий и др. // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 1-2 (104-105). С. 6–12.
6. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : распоряжение ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018. Доступ из справ.-правовой системы АСПИЖТ в локал. сети.
7. Development of a Train Operation Power Simulator Using the Interaction between the Power Supply Network, Rolling Stock Characteristics and Driving Patterns, as Conditions / Y. Takeuchi, T. Ogawa, H. Morimoto et al. // Quarterly Report of RTRI. 2017. Vol. 58. Iss. 2. P. 98–104.

8. Пат. № 2629622 РФ. Система для контроля и регулирования мощности и энергии, расходуемой транспортной системой / В.А. Вербицкий, К.Г. Кисельгоф, И.О. Набойченко и др. № 2016116551 ; заявл. 27.04.2016 ; опублик. 30.08.2017, Бюл. № 25. 13 с.
9. Катыхин А. И., Нехороших И. Н. Разработка метода управления спросом на электроэнергию // *Естественные и технические науки*. 2019. № 4 (130). С. 190–193.
10. Mathematical model of the static reactive power compensator / T.R. Khramshin, G.P. Kornilov, A.A. Murzikov et al. // *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, 2014. DOI 10.1109/APEDE.2014.6958287.
11. Стельмашенко А.В. Математическая модель для исследования влияния напряжения в контактной сети на процесс движения поездов // *Актуальные проблемы железнодорожной науки глазами молодых исследователей : сб. материалов круглого стола, посвящ. Дню железнодорожника*. М., 2022. С. 156–161.
12. Гамм А.З., Голуб И.И., Бершанский Р.В. Эффективный метод определения слабых связей в электроэнергетической системе // *Электричество*. 2010. № 9. С. 31–37.
13. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control / H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. Vol. 93. P. 384–394. DOI 10.1016/j.ijepes.2017.06.014.
14. Novak H., Lešić V., Vašak M. Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20. Iss. 2. P. 2715–2727. DOI 10.1109/TITS.2018.2882087.
15. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В.А. Ушаков и др. Иркутск : ИРГУПС, 2012. 129 с.
16. Малыгина М.П., Герасимов Д.А. Мультиагентные системы искусственного интеллекта // *Научные труды КубГТУ*. 2018. № 3. С. 476–484.
17. Пшенокова И.А., Анчиков М.И., Макоева Д.Г. Архитектура мультиагентной когнитивной системы процесса принятия решений в интеллектуальных средах обитания // *Изв. Кавказского федерального университета*. 2018. № 4 (84). С. 28–32.
18. Баранов Л.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах // *Надежность*. 2022. Т. 22. № 3. С. 35–43.

References

1. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 867r ot 12.05.2016 «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» (red. 05.12.2023) [Order of JSC «Russian Railways» No. 867r dated May 12, 2016 «On approval of the rules of traction calculations for train operation» (ed. December 5, 2023)].
2. GOST R 57670-2017. Sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi. Metodika vybora osnovnykh parametrov [State Standard R 57670-2017. The railway track power supply systems. The methods of selecting fundamental parameters]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 52 p.
3. Dolgii A.I., Sakharov A.G., Dezhkov M.A., Makievskii S.A., Chernin M.A. «Virtual'naya stseпка» na Vostochnom poligone: dostignutyie efekty i napravleniya razvitiya [«Virtual coupling» at the Eastern polygon: achieved effects and development directions]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2023, no. 5-6 (108-109), pp. 15–19.
4. Bushuev S.V., Gundyrev K.V., Golochalov N.S. Povyshenie propusknnoi sposobnosti uchastka zheleznoi dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noi stseпки [Increasing the throughput capacity of a railway section using virtual coupling technology]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 1–20.
5. Andreev V.E., Pronkin A.V., Dolgii A.I., Rosenberg E.N. Razvitie tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov: itogi i perspektivy [Development of technologies for interval regulation of train traffic: results and prospects]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2023, no. 1-2 (104-105), pp. 6–12.
6. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 769/r ot 17.04.2018 «Ob utverzhdenii strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga)» [Order of JSC «Russian Railways» No 769/r dated April 17, 2018 «On approval of the strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book)»].
7. Takeuchi Y., Ogawa T., Morimoto H., Imamura Y., Minobe S., Sugimoto S. Development of a Train Operation Power Simulator Using the Interaction between the Power Supply Network, Rolling Stock Characteristics and Driving Patterns, as Conditions. *QR of RTRI*, 2017, vol. 58, iss. 2, pp. 98–104.
8. Verbitskii V.A., Kisel'gof K.G., Naboichenko I.O., Rakov V.V., Rozenberg E.N., Rozenberg I.N., Shurdak A.V. Patent RU 2629622 C1, 30.08.2017.
9. Katelykhin A.I., Nekhoroshikh I.N. Razrabotka metoda upravleniya sprosom na elektroenergiyu [Development of a method for managing electricity demand]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences], 2019, no. 4 (130), pp. 190–193.
10. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandayev A.S., Khramshin V.R. Mathematical model of the static reactive power compensator. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, 2014. DOI 10.1109/APEDE.2014.6958287.
11. Stel'mashenko A.V. Matematicheskaya model' dlya issledovaniya vliyaniya napryazheniya v kontaktnoi seti na protsess dvizheniya poezdov [Mathematical model for studying the influence of voltage in the contact network on the process of train movement]. *Sbornik materialov kruglogo stola, posvyashchennogo Dnyu zheleznodorozhnika «Aktual'nye problemy zheleznodorozhnoi nauki glazami molodykh issledovatelei»* [Proceedings of the round table dedicated to the Railway Worker's Day «Current problems of railway science through the eyes of young researchers»]. Moscow, 2022, pp. 156–161.

12. Gamm A.Z., Golub I.I., Bershanskii R.V. Effektivnyi metod opredeleniya slabykh svyazei v elektroenergeticheskoi sisteme [An effective method for determining weak connections in the electrical power system]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 9, pp. 31–37.
13. Yassami H., Bayat F., Jalilvand A., Rabiee A. Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 93, pp. 384–394. DOI 10.1016/j.ijepes.2017.06.014.
14. Novak H., Lešić V., Vašak M. Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 20, iss. 2, pp. 2715–2727. DOI 10.1109/TITS.2018.2882087.
15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. Operativnoe upravlenie v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznikh dorog [Operational management in railway power supply systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. 129 p.
16. Malykhina M.P., Gerasimov D.A. Mul'tiagentnye sistemy iskusstvennogo intellekta [Multi-agent artificial intelligence systems]. *Nauchnye trudy KubGTU* [Proceedings of the Kuban State University of Technology], 2018, no. 3, pp. 476–484.
17. Pshenokova I.A., Anchekov M.I., Makoeva D.G. Arkhitektura mul'tiagentnoi kognitivnoi sistemy protsessa prinyatiya reshenii v intellektual'nykh sredakh obitaniya [Architecture of a multi-agent cognitive system of the decision-making process in intelligent living environments]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletins of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 4 (84), pp. 28–32.
18. Baranov L.A., Safronov A.I., Sidorenko V.G. Planirovanie dvizheniya poezdov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Planning train traffic in intelligent transport systems]. *Nadezhnost'* [Reliability], 2022, vol. 22, no. 3, pp. 35–43.

Информация об авторах

Денисов Илья Николаевич, преподаватель кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: idenisov89@mail.ru.

Третьяков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск; e-mail: eugentr@mail.ru.

Information about the authors

Ilya N. Denisov, Lecturer of the Department of Rolling Stock Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: idenisov89@mail.ru.

Evgenii A. Tret'yakov, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University, Omsk; e-mail: eugentr@mail.ru.