

Е. А. Третьяков, И. Н. Денисов, Е. Г. Авдиенко

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ НА ОСНОВЕ МГНОВЕННЫХ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Рассмотрены вопросы управления взаимодействием электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры железных дорог в условиях ограниченной энергетической инфраструктуры на экспериментальном электрифицированном участке переменного тока Западно-Сибирской железной дороги. Получены результаты движения грузовых электровозов с установленным измерительным оборудованием на электроподвижном составе и двух тяговых подстанциях электрифицированного участка переменного тока. Выполнен мгновенный расчет степени влияния электровозов на параметры системы тягового электроснабжения (в том числе на узлы напряжения с другими электровозами), степени взаимного влияния электровозов. Определены управляющие воздействия на электроподвижной состав с учетом статусов других поездов в реальном времени на основе измерений токов, напряжений, мощности и других параметров в условиях ограничения мощности системы тягового электроснабжения. Предлагаемый подход позволит в реальном времени получать по данным загрузки тяговых подстанций, напряжений в межподстанционной зоне ограничения, на движение поезда по межпоездным интервалам, предельной скорости движения, исходя из энергетических условий в реальной обстановке, координируя управляющие воздействия между поездами в межподстанционной зоне на основе приоритета.

Ключевые слова: управление, электроподвижной состав, мгновенный тяговый расчет, режим работы, координация, система электроснабжения железных дорог.

Для цитирования: Третьяков, Е. А. Управление электроподвижным составом на основе мгновенных тяговых расчетов с учетом режимов работы системы электроснабжения железных дорог / Е. А. Третьяков, И. Н. Денисов, Е. Г. Авдиенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 242–252. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_242.

Введение

Одним из известных подходов к повышению пропускной способности электросетевых объектов без их реконструкции и строительства является управление спросом, особенно при существенно неравномерном графике нагрузок по питающим центрам, как в случае с электрифицированными железными дорогами. В частности, перспективным вариантом повышения пропускной способности является оптимизация ситуационного управления электротяговыми нагрузками в зависимости от их приоритета на основе определения мгновенной загрузки системы тягового электроснабжения [1]. Технологии управления спросом на электротяговые нагрузки, в отличие от активных потребителей электроэнергетических систем [2], имеют ряд особенностей, связанных с пространственным перемещением электроподвижного состава, ограничениями графика движения поездов.

Представленная проблематика является актуальной и имеет потенциал для развития научных исследований, особенно в условиях цифровой трансформации и связанными с ней процессами повышения наблюдаемости и управляемости режимами нагрузок и системы электроснабжения железных дорог.

Основная часть

В работе [3] авторы предлагают идею согласования режимов электроподвижного состава на межподстанционной зоне между собой для обеспечения более полного использования энергии рекуперации соседними поездами, следующими в режиме тяги, а также для исключения перегрузок системы тягового электроснабжения и превышения допустимых параметров отклонения напряжения на токоприемнике. Разработанных методов и способов реализации данного подхода авторами не представлено.

Известные подходы [4–6] к управлению спросом на электротяговые нагрузки в контексте рассматриваемой проблематики содержат следующие принципы:

– контроль загрузки системы тягового электроснабжения осуществляется по мощности или электроэнергии по питающим линиям от системы внешнего электроснабжения;

– управление электроподвижным составом осуществляется путем выдачи управляющих воздействий на режим работы электровоза, связанный со значением потребляемой мощности (режим, позиция, скорость).

Основные недостатки представленных подходов к управлению спросом на электротяговые нагрузки железнодорожного транспорта:

– в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог не осуществляется регулирование параметров режима по напряжению, потокам мощности с учетом интересов электроподвижного состава, например, при рекуперации, при преодолении лимитирующего подъема поездом, ограничившись стабилизацией напряжения устройствами компенсации реактивной мощности, быстродействующими регуляторами и прочими техническими средствами. Никакие сигналы с электротяговых нагрузок при этом не учитываются;

– отсутствие координации в работе устройств электроснабжения и электротяговых нагрузок существенно снижает эффективность известных подходов к управлению спросом на электротяговые нагрузки. Кроме этого, научная проработка рассматриваемой проблематики на железнодорожном транспорте находится на начальном этапе и имеет значительный потенциал развития.

Целью данного исследования является разработка принципов управления электроподвижным составом на основе мгновенных тяговых расчетов с учетом режимов работы системы электроснабжения железных дорог в условиях ограничений энергетической инфраструктуры на экспериментальном электрифицированном участке переменного тока на Западно-Сибирской железной дороге [1].

Основные задачи:

1 получение экспериментальных результатов движения грузовых электровозов с установленным измерительным оборудованием на электроподвижном составе и двух тяговых подстанциях электрифицированного участка переменного тока;

2 оценка влияния электротяговых нагрузок на напряжения в произвольных узлах контактной сети, шин фидеров тяговых подстанций, а также на загрузку питающих фидеров на основе схемы замещения;

3 уточнение принципов мгновенного тягового расчета движения поезда (позиция, скорость, мощность) с учетом результатов измерений с бортовых систем электровоза;

4 определение предельной потребляемой мощности электровоза в каждый момент времени на основе данных о местоположении поездов на межподстанционной зоне и измеренных (рассчитанных) параметрах режимов системы тягового электроснабжения (напряжение на токоприемнике, загрузка фидеров контактной сети и линий внешнего электроснабжения тяговых подстанций);

5 реализация технологии управления спросом на электротяговые нагрузки на межподстанционной зоне двухпутного участка переменного тока путем корректировки графика движения и параметров режимов электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения (при наличии устройств регулирования).

В ходе проведения экспериментальных испытаний на два электровоза ВЛ80с № 1738 и № 1831 в составе поезда и на четыре фидера контактной сети двух смежных тяговых подстанций электрифицированного участка переменного тока устанавливалось измерительное и коммуникационное оборудование (рис. 1), обеспечивающее измерение, хранение и передачу на удаленный сервер токов, напряжений, мощностей. Измерения осуществлялись с синхронизацией по GPS в течение 12 часов.

В процессе поездки данные принимались непосредственно с тяговых подстанций Ш и С, двух электровозов, движущихся в попутном направлении. Данные фиксировались и записывались в память портативного компьютера ежесекундно с синхронизацией времени через GPS, отправлялись на сервер и обратно на электровозы для визуального отображения тока, напряжения электровозов и подстанций. Это позволяло в реальном времени в процессе поездки визуализировать нагрузку электровозов в зависимости от загруженности подстанций.

В ходе проведения экспериментальных работ на подстанциях и электровозах было использовано следующее измерительное и коммуникационное оборудование:

- модуль ввода ADAM-4017-D2E, 8 каналов аналогового ввода, Modbus ASCII Advantech;
- преобразователь интерфейса USB-RS485;
- GPRS терминал TELEOFIS WRX768-L4;
- модуль преобразования среднеквадратичного значения AD637;
- датчик постоянного тока АНКС-КАА ACREL;
- GPS трекер SMART S-2412;

– измерительные клещи CPR-1000 CIRCUTOR.

Измерения осуществлялись согласно утвержденной программе по действующим значениям с дискретностью 10 точек в секунду и синхронизацией между собой с помощью GPS.

Данные принимались и обрабатывались на промышленные компьютеры и ноутбуки.

Ведение экспериментальных поездов массой по 4000 тонн осуществлялось с установленным межпоездным интервалом 12 минут. Примеры полученных результатов измерений представлены на рис. 2.

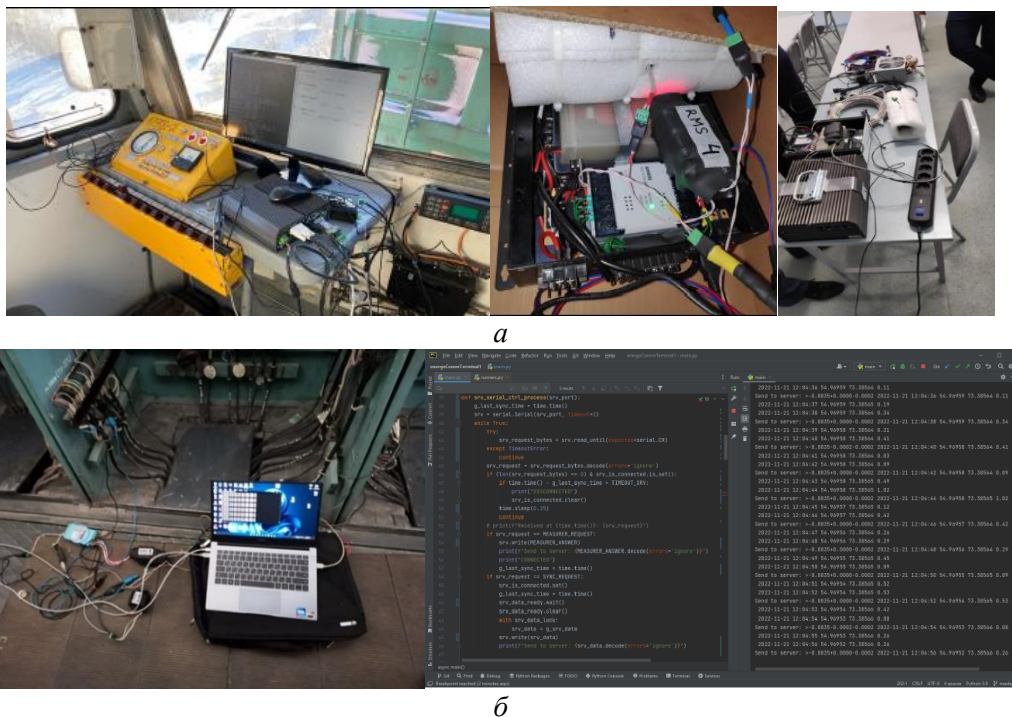


Рис. 1. Измерительное и коммуникационное оборудование:

a – измерительное оборудование на электровозе;

б – измерительное оборудование на тяговой подстанции

В рамках решения поставленных задач выполнена оценка влияния электротяговых нагрузок на напряжения в произвольных узлах контактной сети, шин фидеров тяговых подстанций на основе схемы замещения путем вычисления коэффициентов чувствительности напряжения на токоприемниках к изменению потребляемых токов посредством теории сенсорного анализа [3].

Указанные коэффициенты чувствительности являются обратными коэффициентами матрицы вида:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Изменение параметров режима системы электроснабжения железных дорог, которые чувствительны к изменению активных ΔP и реактивных ΔQ тяговых нагрузок, можно рассчитать в малыхращениях на основе линеаризованного уравнения:

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\Delta \delta$, ΔU – изменения фаз и модулей напряжения.

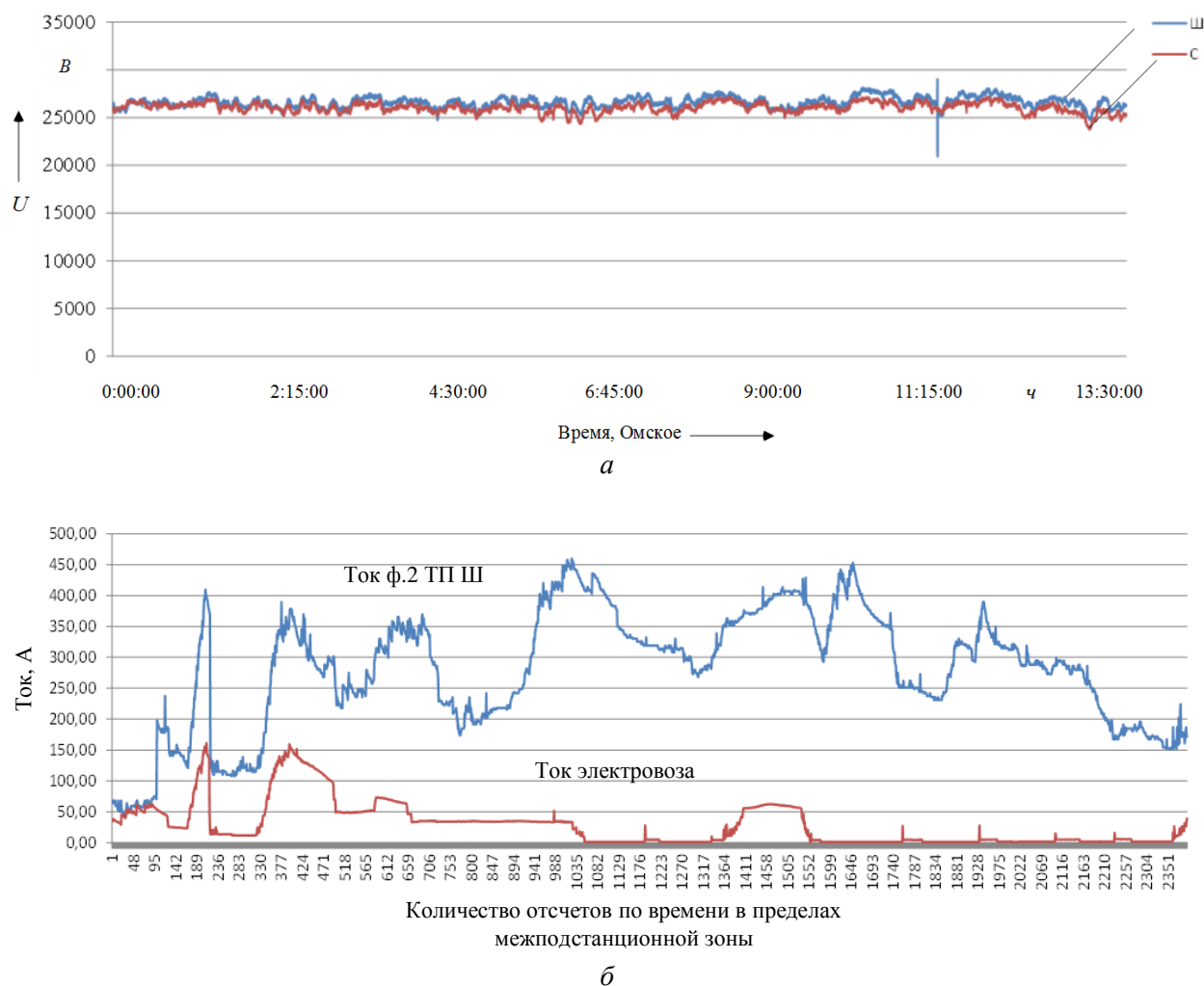


Рис. 2. Примеры полученных результатов измерений:

a – напряжения на шинах ТП Ш, ТП С;

б – ток электровоза № 1831 и ф.2 ТП Ш (фрагмент)

Электровозы последних серий обладают микропроцессорной системой управления и полупроводниковыми тяговыми преобразователями, поэтому линейная зависимость потребляемого тока ЭПС от напряжения не поддерживается, как на контакторно-релейных силовых схемах электровозов старых серий. Поэтому задание тяговых нагрузок в виде мощностей является предпочтительнее, чем в виде источников тока. Недостатком известного подхода [5] является линейность источников тока (тяговых нагрузок) от приложенного напряжения, что вносит существенную погрешность в расчеты системы тягового электроснабжения, т. к. тяговым нагрузкам свойственна постоянная мощность при изменении напряжения и/или изменение с заданным законом управления.

Взаимосвязь электротяговых нагрузок с параметрами напряжения в тяговой сети определяется на основе схемы замещения и системы уравнений в узловой матричной форме:

$$[\hat{U}_d]([\underline{Y}_y] \cdot [\dot{U}] + [\underline{Y}_6] \cdot [\dot{U}_6]) = [\hat{S}_y], \quad (5)$$

где $[\hat{U}_d]$ – диагональная матрица сопряженных комплексов напряжений узлов; $[\hat{S}_y]$ – вектор-столбец сопряженных мощностей в узлах; \underline{Y}_y – матрица узловых проводимостей:

$$Y_y = M \cdot Y_b \cdot M^T, \quad (6)$$

M – матрица инцидентности; Y_b – матрица проводимостей ветвей.

Мгновенная схема замещения двухпутного участка системы тягового электроснабжения переменного тока может быть представлена в виде рис. 3.

Упрощенно:

$$dU_i = \sum_{j=1} k_i \cdot dS_j.$$

Под коэффициентом k_i (В/В·А) понимается степень влияния мощности нагрузки S_j в j -м узле на напряжение в i -м. Определяется на основе представленных выше частных производных.

Матрица инцидентности для схемы замещения имеет вид:

$$M := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ M := & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Результаты расчета значений коэффициентов чувствительности k_i по напряжению (В/В·А) к изменению нагрузки в некоторых узлах представлены на рис. 4.

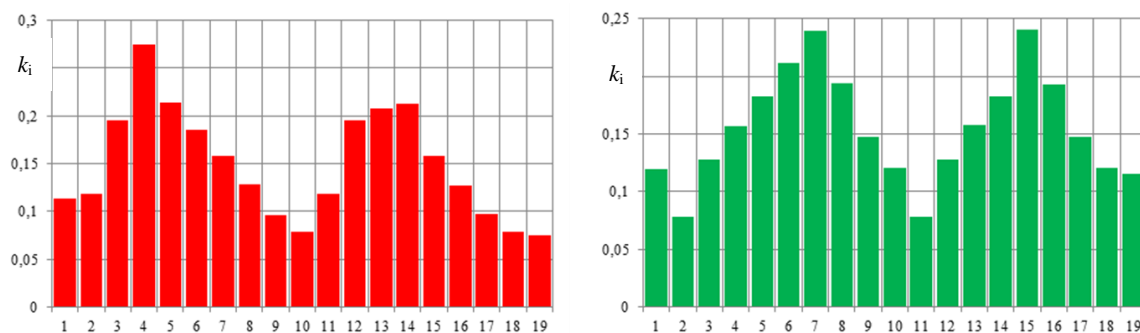


Рис. 4. Значение коэффициентов чувствительности k_i по напряжению к изменению нагрузки по узлам схемы замещения:

a – увеличение нагрузки S4 на 100 %;

б – увеличении нагрузки S8 на 50 % и S4 на 100 %

Таким образом, степень влияния электровозов на параметры режимов системы тягового электроснабжения оценивается по коэффициентам влияния, полученным на основе частных производных (элементов матрицы Якоби). Вклад отдельных электровозов в изменение напряжения в произвольном узле тяговой сети рассчитывается по выражению (6). Вклад мощности k -х тяговых нагрузок в загрузку фидеров тяговых подстанций $\Delta\omega_k$ определяется на основе мгновенных схем замещения с оценкой состояния по данным измерений методом наименьших квадратов.

Наличие синхронизированных измерительных систем, расположенных на электровозе и тяговых подстанциях, позволяет обеспечить оценку влияния мощности электроподвижного состава на загрузку тяговых подстанций и параметры режима системы тягового электроснабжения (прежде всего по напряжению).

Управление спросом на электротяговые нагрузки целесообразно осуществлять исходя из следующих условий:

- ограничения мощности системы тягового электроснабжения (снижение/смещение пиков нагрузки);
- ограничения напряжений на лимитирующем участке межподстанционной зоны;
- минимизация потерь мощности/электроэнергии в системе тягового электроснабжения;
- минимизация расхода электроэнергии и оптимизация эксплуатационных показателей при соблюдении графика движения поездов;
- повышение доли рекуперированной электроэнергии электроподвижным составом;
- повышение пропускной способности участка за счет изменения ограничений системы тягового электроснабжения.

В рамках решаемых в настоящем исследовании задач рассмотрим управление спросом на электротяговые нагрузки в условиях ограничений мощности энергетической инфраструктуры на рассматриваемом участке.

На рассматриваемом участке перегона Ш-С отсутствует движение электровозов, оборудованных рекуперативным торможением.

Математическая постановка реализации режимов работы электроподвижного состава применительно к рассматриваемому участку может быть выполнена на основе оптимального приращения мощности электровозов при обеспечении заданного (или скорректированного) графика движения поездов.

Реализация технологии управления спросом на электротяговые нагрузки на межподстанционной зоне двухпутного участка переменного тока путем корректировки графика движения и параметров режимов электроподвижного состава (режим, позиция, скорость, мощность) и системы тягового электроснабжения (при наличии устройств регулирования) целесообразно реализовать на основе самоорганизующейся мультиагентной системы [8–10].

В качестве модели управления спросом на электротяговые нагрузки системы электроснабжения железных дорог при заданных ограничениях мощности (напряжения) в заданный период времени предлагается подход в виде максимизации мощности подключенных тяговых нагрузок с учетом чувствительности нагрузки фидера тяговой подстанции к изменению нагрузки электровозов, ценовой характеристики нагрузки, приоритета нагрузки:

$$F(y_k) = \sum_{k=1}^m P_k \nu_k \cdot \Delta\omega_k \cdot y_k \rightarrow \max, \quad (8)$$

при ограничениях:

$$y_{k \min}, y_{k \max} \in (0-1), \nu_k, \Delta\omega_k \in (0-1),$$

$$\sum_{k=1}^m P_k \cdot y_k \leq P_{\text{оп}}, U_{k \min} \leq U_k < U_{k \max}, P_{k \min} \leq P_k < P_{k \max},$$

$$y_{k \min} \leq y_k < y_{k \max},$$

$$P_k \in B; G,$$

где ν_k – приоритет нагрузки (в диапазоне 0–1); $\Delta\omega_k$ – коэффициент чувствительности мощности фидера тяговой подстанции к изменению мощности k -го электровоза (в диапазоне 0–1); y_k – коэффициент загрузки (в диапазоне 0–1); m – количество тяговых нагрузок на межподстанционной зоне; P_k – мощность k -й тяговой нагрузки (тяга, рекуперация) без управления спросом; $P_{\text{оп}}$ – опорная мощность по фидеру тяговой подстанции (учитывает степень загрузки и потери мощности в тяговой сети); U_k – напряжение на токоприемнике k -го электровоза; B – допустимый набор электровозов в соответствии с графиком движения, прочих логических условий, соответствующих спискам смежности; G – список смежности, описывающий связи тяговых нагрузок, входящих в технологическую операцию процесса движения поездов.

Коэффициент чувствительности нагрузки фидера тяговой подстанции к изменению нагрузки k -го электровоза $\Delta\omega_k$ рассчитывается на основе (6) по заданной мгновенной схеме замещения тяговой сети.

Определение предельной потребляемой мощности электровоза в каждый момент времени на основе данных местоположения поездов на межподстанционной зоне и измеренных (рассчитанных)

параметрах режимов системы тягового электроснабжения (напряжение на токоприемнике, загрузка фидеров контактной сети и линий внешнего электроснабжения тяговых подстанций) (корректировка графика движения) осуществляется на основе приращений мощности электровозов:

$$\Delta P_k = \pm P_k \cdot y_k. \quad (9)$$

На основе допустимых мгновенных приращений потребляемой и генерируемой (в режиме рекуперации) мощности электровозов выполняется мгновенный тяговый расчет с определением тягово-энергетических параметров движения поезда, обеспечивающих заданную тяговую нагрузку на участке.

Представленный подход к управлению тяговыми нагрузками в условиях ограничений мощности энергетической инфраструктуры может быть реализован при условии прогнозирования параметров поезда до 1 ч. Прогнозирование может выполняться встроенными функциями на основе статистических моделей.

Рассмотрим реализацию предлагаемого подхода на примере рассматриваемой схемы замещения для одного момента времени. Основные данные и результаты расчетов представлены в таблице.

Основные данные и результаты расчетов

| Показатель | Значение для тяговых нагрузок (рис. 3) | | | | | | | | | |
|---|--|---------|---------|-------|----------|-------|----------|----------|-------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| v_k | | 1 | 0,9 | | 1 | | 0,6 | 0,8 | | 0,7 |
| $\Delta \omega_{k1}$ | 0,94 | 0,82 | 0,71 | 0,62 | 0,43 | 0,35 | 0,25 | 0,19 | 0,11 | 0,07 |
| $\Delta \omega_{k25}$ | 0,05 | 0,17 | 0,28 | 0,37 | 0,51 | 0,6 | 0,69 | 0,74 | 0,85 | 0,91 |
| $P_{\text{оп}} = 15,9 \text{ МВт}, \sum_{k=1}^m P_k = 15,9 \text{ МВт}$ | | | | | | | | | | |
| $S_k = P_k + iQ_k$, МВт | | 4+i3,28 | 3+i2,46 | | | | 3,1+i2,7 | 3,3+i2,8 | | 2,5+i2,05 |
| U_k , кВ | 26,87 | 24,56 | 24,52 | 25,0 | 26,63 | 26,79 | 24,71 | 24,46 | 25,24 | 26,64 |
| y_k | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | | 1 |
| $P_{\text{оп}} = 15,9 \text{ МВт}, \sum_{k=1}^m P_k = 17,8 \text{ МВт}$ | | | | | | | | | | |
| y_k | | 1 | 0,89 | | | | 0,75 | 0,75 | | |
| U_k , кВ | 26,15 | 24,59 | 24,55 | 24,98 | 25,81 | 26,15 | 24,66 | 24,58 | 24,73 | 25,81 |
| $S_k = P_k + iQ_k$, МВт | | 4+i3,28 | 3+i2,46 | | 1,9+i2,0 | | 3,1+i2,7 | 3,3+i2,8 | | 2,5+i2,05 |
| $\Delta P_k = \pm P_k \cdot y_k$, МВт | | 0 | -0,32 | | | | -0,17 | -0,31 | | 1,1 |

Выводы

Результатом решения задачи (8) является множество $y_k = \{y_1, y_2, y_3 \dots y_k\}$, $y_k \in (0-1)$, в соответствии с которым осуществляется определение управляющих воздействий через мгновенный тяговый расчет по значениям ΔP_k . В случае превышения мощности тяговых нагрузок заданной величины осуществляется определение ΔP_k для k -го электровоза с учетом приоритета нагрузки и чувствительность нагрузки фидера тяговой подстанции к изменению нагрузки k -го электровоза. Мгновенный тяговый расчет движения поезда по данным измерений в реальном времени позволяет контролировать энергетические параметры движения локомотивов в межподстанционной зоне (потребляемый ток, мощность, коэффициент мощности, напряжение на токоприемнике) и связывать их со скоростью движения, позицией, режимом работы с учетом местоположения, профиля пути.

Указанный подход позволит в реальном времени получать по данным загрузки тяговых подстанций, напряжений в межподстанционной зоне ограничения на движение поезда по межпоездным интервалам, предельной скорости движения исходя из энергетических условий в реальной обстановке, координируя управляющие воздействия между поездами в межподстанционной зоне на основе приоритета (корректировка нормального графика движения).

За счет управления спросом в период пиковых нагрузок системы тягового электроснабжения можно повысить пропускную способность за счет уменьшения межпоездного интервала, а точнее за счет его определения по данным измерений в реальном времени, а не по данным усредненных расчетов. Развитие технологий цифровых тяговых подстанций и «умных» локомотивов невозможно без создания информационно-управляющих систем для электроподвижных составов и устройств системы тягового электроснабжения в реальном времени.

Список литературы

1 Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : Распоряжение заместителя генерального директора ОАО «РЖД» – главного инженера С.А. Кобзева № 769-р : [утверждено заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – главным инженером С. А. Кобзевым 17 апреля 2018 г.]. – Москва : Проспект; Санкт-Петербург : Кодекс, 2018. – 128 с.

2 **Третьяков, Е. А.** Управление спросом активных потребителей в распределительных электрических сетях / Е. А. Третьяков, Н. Н. Малышева // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 190–202. – ISSN 1810-1909.

3 Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии «виртуальная сцепка» / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3 (67). – С. 173–180. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).173-180.

4 **Бушуев, С. В.** Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 1–20. – DOI 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.

5 **Полянов, В. В.** Методика моделирования электромагнитной совместимости на участках тяжеловесного движения поездов / В. В. Полянов // Вестник Уральского Государственного университета путей сообщения (УРГУПС). – 2016. – № 2. – С. 119–127. – DOI 10.20291/2079-0392-2016-2-119-127.

6 **Yassami, H.** Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control / H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand, A. Rabiee // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – No. 93. – P. 384–394. – DOI.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.014.

References

1 On approval of the strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period until 2025 and for the future until 2030 (White Book: Order of the Deputy General Director of Russian Railways JSC – Chief Engineer S. A. Kobzev No. 769-r : [approved by Deputy General Director of JSC Russian Railways – Chief Engineer S. A. Kobzev on April 17, 2018] – Moscow : Prospect; Saint Petersburg: Codex, 2018. – P. 128.

2 **Tretyakov, E. A.** Demand management of active consumers in electrical distribution networks / E. A. Tretyakov, N. N. Malysheva // Bulletin of the Chuvash University. – 2020. – No 1. – P. 190–202. – ISSN 1810-1909.

3 Assessing the compatibility of the traction power supply system when introducing interval control of train traffic using the “virtual coupling” technology / N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, Yu. I. Belogolov, V. V. Kashkovsky // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – No. 3 (67). – P. 173–180. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).173-180.

4 **Bushuev, S. V.** Increasing the throughput capacity of a railway section using virtual coupling technology / S. V. Bushuev, K. V. Gundyrev, N. S. Golochalov // Automation in transport. – 2021. – Vol. 7. – No. 1. – P. 1–20. – DOI 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.

5 **Polyanov, V. V.** Methodology for modeling electromagnetic compatibility in sections of heavy train traffic / V. V. Polyanov // Bulletin of the Ural State University of Railway Transport (UR-GUPS). – 2016. – No. 2. – P. 119–127. – DOI 10.20291/2079-0392-2016-2-119-127.

6 **Yassami, H.** Coordinated voltage control of wind-penetrated power systems via state feedback control / H. Yassami, F. Bayat, A. Jalilvand, A. Rabiee // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – No. 93. – P. 384–394. – DOI.org/10.1016/j.ijepes.2017.06.014.

7 **Оленцевич, В. А.** Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке / В. А. Оленцевич, Р. Ю. Упырь, А. А. Антипина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 2 (66). – С. 182–189. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182-189.

8 **Малыхина, М. П.** Мультиагентные системы искусственного интеллекта / М. П. Малыхина, Д. А. Герасимов // Научные труды КубГТУ. – 2018. – № 3. – С. 476–484. – ISSN 2312-9409.

9 **Пшенокова, И. А.** Архитектура мультиагентной когнитивной системы процесса принятия решений в интеллектуальных средах обитания / И. А. Пшенокова, М. И. Анчечков, Д. Г. Макоева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – № 4(84). – С. 28–32. – ISSN 1991-6639.

10 **Баранов, Л. А.** Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах / Л. А. Баранов, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Надежность. – 2022. – № 22(3). – С. 35–43. – DOI 10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43.

7 **Olentsevich, V. A.** Efficiency of introducing interval control of train traffic using the “virtual coupling” system on the section / V. A. Olentsevich, R. Yu. Upyr, A. A. Antipina // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – No. 2 (66). – P. 182–189. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).182-189.

8 **Malykhina, M.P.** Multi-agent systems of artificial intelligence / M. P. Malykhina, D. A. Gerasimov // Scientific works of KubSTU. – 2018. – No. 3. – P. 476–484. – ISSN 2312-9409.

9 **Pshenokova, I. A.** Architecture of a multi-agent cognitive system of decision-making in intelligent environments / I. A. Pshenokova, M. I. Anchekov, D. G. Makoeva // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2018. – No. 4(84). – P. 28–32. – ISSN 1991-6639.

10 **Baranov, L. A.** Planning train traffic in intelligent transport systems / L. A. Baranov, A. I. Safonov, V. G. Sidorenko // Reliability. – 2022. – No. 22(3). – P. 35–43. – DOI 10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43.

E. A. Tretyakov, I. N. Denisov, E. G. Avdienko

CONTROL OF ELECTRIC ROLLING STOCK BASED ON INSTANT TRACTION CALCULATIONS USING THE SYSTEM OPERATING MODES RAILWAY ELECTRIC SUPPLY

Abstract. The paper considers the issues of managing the interaction of electric rolling stock and the energy infrastructure of railways in the conditions of limitations of the energy infrastructure on the experimental electrified alternating current section of the West Siberian Railway. It is obtained the results of the movement of electric freight locomotives with installed measuring equipment on electric rolling stock and two traction substations of the electrified alternating current section. An instant calculation was made of the degree of influence of electric locomotives on the parameters of the traction power supply system including voltage nodes with other electric locomotives, the degree of mutual influence of electric locomotives; control actions on electric rolling stock were determined to provide the statuses of other trains in real time based on measurements of currents, voltages, power and other parameters under conditions of limited power of the traction power supply system. The proposed approach will make it possible to obtain in real time, based on data on the load of traction substations, voltages in the inter-substation zone, restrictions on train movement at inter-train intervals, maximum speed based on energy conditions in a real situation, coordinating control actions between trains in the inter-substation zone based on priority.

Keywords: control, electric rolling stock, instantaneous traction calculation, operating mode, coordination, railway power supply system.

For citation: Tretyakov, E. A. Control of electric rolling stock based on instant traction calculations using the system operating modes railway electric supply / E. A. Tretyakov, I. N. Denisov, E. G. Avdienko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4. – P. 242–252. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_242.

Сведения об авторах**Третьяков Евгений Александрович**

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Подвижной состав
электрических железных дорог»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: eugentr@mail.ru

Денисов Илья Николаевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Подвижной состав
электрических железных дорог»,
заведующий лабораторией,
e-mail: idenisov89@mail.ru

Авдиенко Егор Геннадьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Подвижной состав электрических
железных дорог»,
аспирант,
e-mail: sleyster.ua@gmail.com

Information about the authors**Tretyakov Evgeny Alexandrovich**

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Rolling Stock Electric Railways»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: eugentr@mail.ru

Denisov Ilya Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Rolling Stock Electric Railways»,
Head of Laboratory,
e-mail: idenisov89@mail.ru

Avdienko Egor Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Rolling Stock Electric Railways»,
Postgraduate Student,
e-mail: sleyster.ua@gmail.com