

Научная статья  
Статья в открытом доступе  
УДК 621.311  
doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-55-64

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

**Владислав Леонидович Незевак**✉

Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия  
nezevakwl@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

### Аннотация

Резкопеременная тяговая нагрузка в системах тягового электроснабжения обуславливает широкий диапазон изменения уровня напряжения на токоприемниках электроподвижного состава и потребляемой мощности тяговых подстанций. Для стабилизации напряжения и ограничения перегрузок силового оборудования на тяговых подстанциях и линейных устройствах контактной сети применяются различные технические решения. Регулирование указанных устройств осуществляется путем изменения их параметров, что приводит к изменению уровня напряжения или загрузки оборудования. Основной задачей регулируемых устройств в системах тягового электроснабжения является поддержание уровня напряжения на шинах тяговых подстанций или линейных устройств. Решение задач по стабилизации уровня напряжения в контактной сети выполняется с помощью имитационного моделирования, при котором рассмотрению подлежат различные варианты размещения устройств и алгоритмы регулирования мощности и напряжения. В статье рассматриваются вопросы эффективности

регулирования напряжения при сравнении вариантов регулирования напряжения на тяговых подстанциях и постах секционирования при помощи систем накопления электроэнергии. На основе структурной схемы межподстанционной зоны, разработанных имитационной модели и алгоритма регулирования по уровню напряжения получены результаты оценки уровня напряжения на шинах поста секционирования для сформированной электротяговой нагрузки. В ходе имитационного моделирования энергетических процессов в системе тягового электроснабжения, содержащей устройство накопления электроэнергии, получены результаты для различных режимов работы, позволяющие оценить эффективность регулирования напряжения на шинах поста секционирования при стабилизации напряжения на шинах смежных тяговых подстанций.

**Ключевые слова:** система, электроснабжение, подстанция, пост, секционирование, сеть, алгоритм, регулирование, стабилизация, напряжение, мощность, схема.

Ссылка для цитирования:

Незевак В.Л. Моделирование работы систем накопления электроэнергии в условиях регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций / В.Л. Незевак // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 2. – С. 55-64. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-55-64.

Original article  
Open Access Article

## SIMULATION OF ELECTRIC POWER STORAGE SYSTEMS OPERATING IN THE CONDITIONS OF VOLTAGE REGULATION ON THE BUSES OF TRACTION SUBSTATIONS

**Vladislav Leonidovich Nezevak**✉

Omsk State Transport University, Omsk, Russia  
nezevakwl@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

### Abstract

Sharply alternating traction load in traction power supply systems causes a wide range of voltage

changes at the pantographs of electric stocks and the power consumption of traction substations. Various

technologies are used to stabilize the voltage and limit overloads of power equipment at traction substations and linear devices of the contact network. These devices are regulated by changing their parameters, which leads to a change in the voltage level or equipment load. The main task of regulated devices in traction power supply systems is to maintain the voltage level on the buses of traction substations or linear devices. Solving the problems of stabilizing the voltage level in the contact network is carried out using simulation modeling, in which various device placement options and algorithms for regulating power and voltage are subject to consideration. The paper discusses the effectiveness of voltage regulation when comparing voltage regulation options at traction substations and switching

*Reference for citing:*

*Nezevak VL. Simulation of electric power storage systems operating in the conditions of voltage regulation on the buses of traction substations. Transport Engineering. 2025;2:55-64. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-55-64.*

## Введение

Развитие систем тягового электроснабжения обусловлено необходимостью повышения их нагрузочных показателей, связанных с обеспечением роста пропускной и провозной способности железных дорог. В настоящее время для усиления систем тягового электроснабжения разработан перечень мероприятий по повышению пропускной и провозной способности, связанный с увеличением трансформаторной мощности подстанций, сечения контактной сети, монтажом дополнительным линейных устройств контактной сети и реализацией других мероприятий. Совершенствование технических решений, применяемых для повышения эффективности работы систем тягового электроснабжения, привело к появлению класса регулируемых устройств. К указанным техническим решениям относятся: автоматическое регулирование напряжения с помощью устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) [1, 2], регулирования коэффициента трансформации с помощью управляемых реакторов (БАРН) [3, 4], вольтодобавочные устройства постоянного тока с дополнительно подключаемыми преобразовательными агрегатами (ВДУ) [5], устройства автоматического включения и отключения резерва мощности на тяговых подстанциях (АВОР) [6], статические генераторы и компенсаторы реактивной мощности, регулируемые устройства компенсации (УКРМ) [7], системы накоп-

ления энергии [8, 9] и ряд других устройств. Появление класса регулируемых устройств и поиск путей их дальнейшего совершенствования связан с возможностью повышения нагрузочных показателей систем тягового электроснабжения за счет стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций или линейных устройствах контактной сети. Указанный способ используется при разработке и применении алгоритмов регулирования рассматриваемых устройств. К перспективным регулируемым устройствам относятся системы накопления электроэнергии, которые могут применяться как для стабилизации напряжения, так и для решения других задач – выравнивания графика нагрузки, повышение надежности электроснабжения, уровня энергоэффективности [10, 11] и др. Концепция инновационной системы тягового электроснабжения, построение которой выполняется на основе цифровых технологий, предусматривает взаимное регулирование устройств системы тягового электроснабжения, показатели работы которых оказывают влияние друг на друга. В связи с этим актуальными являются исследования в области повышению эффективности регулирования устройств, в том числе систем накопления электроэнергии, в тяговом электроснабжении в различных условиях.

**Keywords:** system, electrical supply, substation, station, switching, network, algorithm, regulation, stabilization, voltage, power, scheme.

ления электроэнергии [8, 9] и ряд других устройств.

Появление класса регулируемых устройств и поиск путей их дальнейшего совершенствования связан с возможностью повышения нагрузочных показателей систем тягового электроснабжения за счет стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций или линейных устройствах контактной сети. Указанный способ используется при разработке и применении алгоритмов регулирования рассматриваемых устройств. К перспективным регулируемым устройствам относятся системы накопления электроэнергии, которые могут применяться как для стабилизации напряжения, так и для решения других задач – выравнивания графика нагрузки, повышение надежности электроснабжения, уровня энергоэффективности [10, 11] и др. Концепция инновационной системы тягового электроснабжения, построение которой выполняется на основе цифровых технологий, предусматривает взаимное регулирование устройств системы тягового электроснабжения, показатели работы которых оказывают влияние друг на друга. В связи с этим актуальными являются исследования в области повышению эффективности регулирования устройств, в том числе систем накопления электроэнергии, в тяговом электроснабжении в различных условиях.

Необходимость регулирования напряжения на шинах распределительных устройств напряжением 3,3 или 25 ( $2 \times 25$ ) кВ тяговых подстанций обусловлена неравномерным графиком электротяговой нагрузки и соответствующими нагрузочными потерями. Стабилизация напряжения на шинах тяговых подстанций позволяет компенсировать нагрузочные потери в контактной сети в ограниченном диапазоне, связанным с ограничением уровня напряжения. Для компенсации нагрузочных потерь в контактной сети применяется регулирование напряжения на постах секционирования путем их преобразования из пассивных в активные. Указанное решение позволяет изменить вид потенциальной диаграммы как для контактной сети постоянного, так и переменного тока. К указанным техническим решениям для систем тягового электроснабжения постоянного тока относятся пункты преобразования напряжения, которые переводят пассивные посты секционирования в активные и стабилизируют уровень напряжения на шинах, переменного тока – устройства компенсации реактивной мощности, реактивная проводимость которых зависит от

уровня напряжения на шинах постов секционирования.

Регулирование напряжения с помощью систем накопления электроэнергии при их размещении на линейных устройствах выполняется одновременно с другими устройствами, находящимися на межподстанционной зоне. При одновременном регулировании снижается степень влияния указанных устройств вследствие их одновременного вклада в компенсацию потерь напряжения в контактной сети. В указанных условиях регулирование по уровню напряжения на шинах линейных устройств контактной сети может иметь недостатки, связанные с отклонением напряжений на шинах тяговых подстанций от номинальных уровней, например, в вынужденных режимах работы систем тягового электроснабжения. Отмеченные особенности работы регулируемых устройств приводят к необходимости изменения рабочих характеристик устройств, в частности изменения уровня напряжения стабилизации  $U_{ref}$ . Различные режимы работы систем тягового электроснабжения приводят к соответствующему изменению основных показателей работы устройств накопления электроэнергии (СНЭЭ).

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Алгоритмы регулирования работы СНЭЭ реализованы в разработанной имитационной модели системы тягового электроснабжения (СТЭ). Имитационная модель содержит тяговые подстанции и пост секционирования и реализована в программной среде Matlab.

Результаты моделирования получены для условий изменения тяговой нагрузки, носящей вероятностный характер. На основании полученных результатов моделирования выполняется оценка эффекта регулирования напряжения для четырех вариантов – базового, в котором на шинах смежных тяговых подстанций реализована функция стабилизации напряжения, и трех расчетных вариантов, в которых дополнительно регулирование напряжения реализовано на шинах поста секционирования.

В системах тягового электроснабжения применяемые вольтодобавочные

устройства подразделяются на устройства со ступенчатым или плавным регулированием:

- 1) с помощью неуправляемого преобразовательного агрегата;
- 2) на основе регулирования режимов работы управляемых реакторов, позволяющих осуществлять плавное изменение коэффициента трансформации.

Плавное регулирование коэффициента трансформации позволяет реализовать горизонтальную внешнюю характеристику выпрямительного преобразователя, где уровень напряжения не зависит от тяговой нагрузки. Функциональные схемы управления для указанных устройств имеют обратную связь, позволяющую изменять коэффициент трансформации в зависимости от уровня напряжения на шинах подстанции.

С целью оценки влияния одновременной работы регулируемых устройств на тяговых подстанциях и постах секционирования далее рассматривается схема замещения межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения постоянного тока. Учет регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций выполнен с использованием регулируемых источников напряжения. Система накопления электроэнергии представлена с помощью источника тока, уровень которого регулируется в зависимости от заданного напряжения. Для имитационного моделирования процессов регулирования на шинах тяговых подстанций и посту секционирования электротяговая нагрузка задана случайным образом в виде источников тока, подключенных между тяговыми подстанци-

ями и постом секционирования контактной сети (рис. 1).

Регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций (ТП1 и ТП2) выполняется с помощью системы автоматического регулирования (САР). Регулирование СНЭЭ, расположенной на шинах поста секционирования (ПС), выполняется в зависимости от уровня напряжения.

Предложенная имитационная модель позволяет выполнить моделирование процессов работы СНЭЭ с учетом стабилизации напряжения на тяговых подстанциях (рис. 2). В модели использован блок дополнительной э.д.с., с помощью которого моделируется изменение коэффициента трансформации путем регулирования напряжения э.д.с.

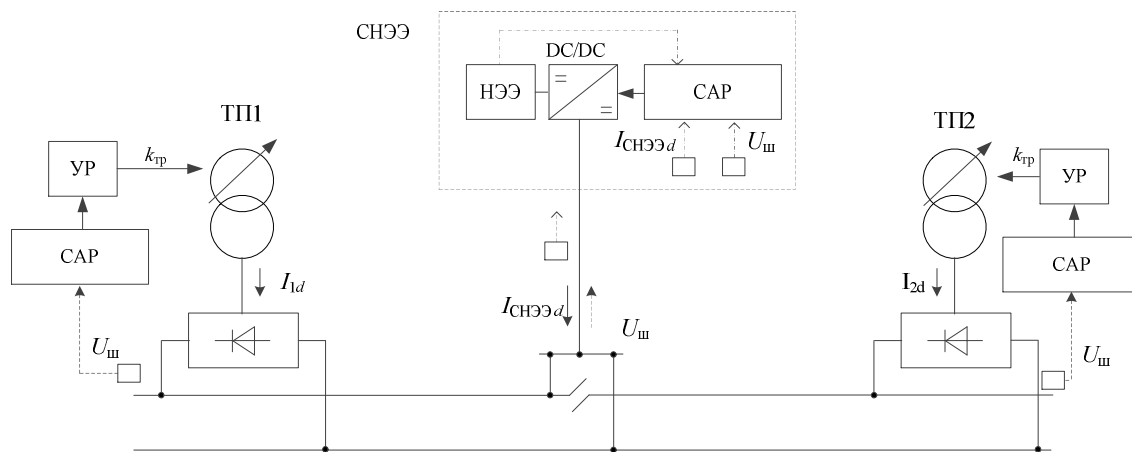


Рис. 1. Структурная схема межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения  
Fig. 1. Block diagram of the substation zone of the traction power supply system

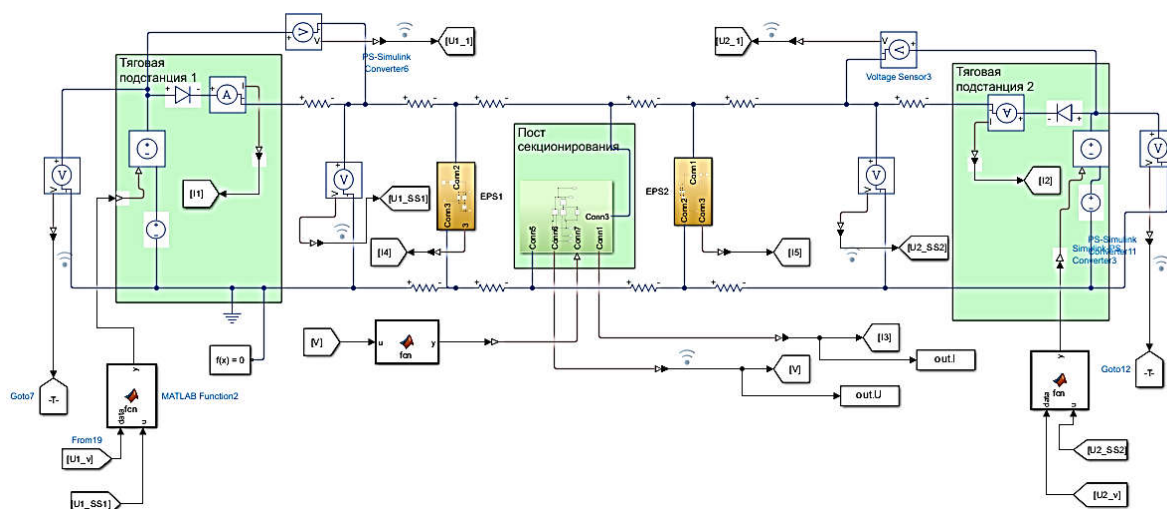


Рис. 2. Имитационная модель межподстанционной зоны  
Fig. 2. Simulation model of the substation zone

Функциональная схема управления СНЭЭ, расположенной на ПС, реализует регулирование по уровню напряжения, при этом опорное напряжение может опреде-

ляться как на постоянная величина, так и рассчитываться в зависимости от уровня напряжения на шинах смежных тяговых подстанций (рис. 3).

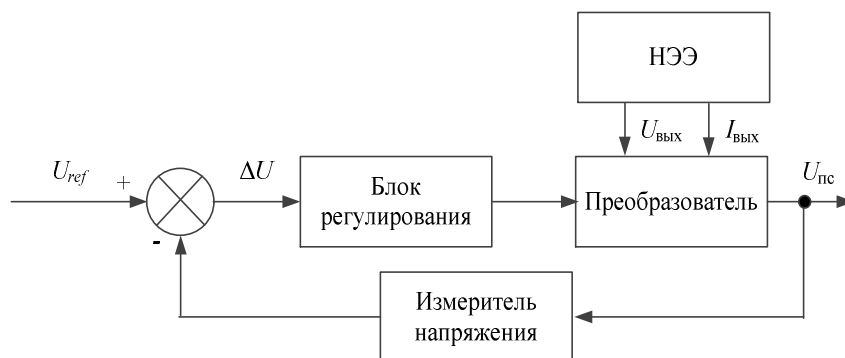


Рис. 3. Функциональная схема управления СНЭЭ  
Fig. 3. Functional control scheme EPSD

В общем случае напряжение на шинах тяговых подстанций отличается, поэтому опорное напряжения для СНЭЭ на шинах ПС принимается относительно минимального среднего напряжения  $U_{cp\ TP1(2)}$  смежных подстанций:

$$U_{ref} = \min(U_{cp\ TP1}, U_{cp\ TP2}) - \Delta U, \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – значение, учитывающее падение напряжения в контактной сети для межподстанционной зоны по условиям работы СНЭЭ.

Регулирование работы СНЭЭ выполняется по алгоритму, в основе которого лежит определение отклонение напряжения от опорного и выбор уровня тока СНЭЭ для соответствующего режима (рис. 4).

Для имитационного моделирования принято, что напряжение стабилизации на шинах подстанций одинаково, в этом случае опорное напряжение для СНЭЭ может быть задано постоянным значением. В общем случае указанный уровень напряжения определяется на основе измерений и является переменным значением. На основании измерений напряжения и тока нагрузки СНЭЭ на посту секционирования выполняется определение режима работы. Ток нагрузки СНЭЭ определяется пропорционально отклонению уровня измеренного напряжения от опорного уровня. Для ограничения максимального тока в режимах заряда и разряда СНЭЭ ток ограничивается соответствующими предельными уровнями.

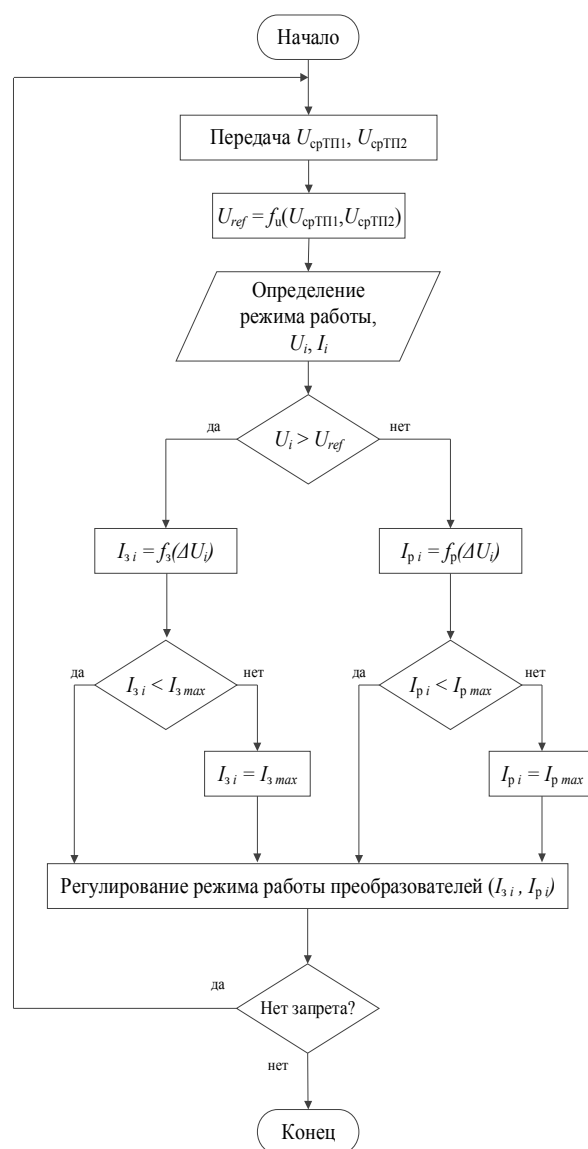


Рис. 4. Алгоритм работы СНЭЭ  
Fig. 4. The algorithm of operation EPSD

При работе СНЭЭ в режимах заряда и разряда возможны эпизоды работы как при стабилизации напряжения, так и стабилизации по току в соответствующих режимах при достижении максимальных токов нагрузки. При сохранении нормального режима работы СНЭЭ система мониторинга технического состояния дает разрешение на продолжение работы, при появлении неисправностей – формируется сигнал управления на запрет дальнейшей работы СНЭЭ.

Регулирование напряжения на тяговых подстанциях при моделировании реализуется путем формирования дополнительного воздействия от регулируемого источника напряжения. На выходе подстанции напряжение на каждом  $i$ -м шаге регулирования определяется по выражению:

$$U_{\text{вых ТП}i} = U_{x.x} + \Delta U_i, \quad (2)$$

где  $\Delta U_i$  – отклонение измеренного напряжения от опорного:

$$\Delta U_i = U_{\text{ref}} - U_{\text{вых ТП}i-1}. \quad (3)$$

В модели принято пропорциональное регулирование тока СНЭЭ, в зависимости от отклонения уровня напряжения на шинах от опорного напряжения:

$$I_{z(p)} = f(\Delta U_i) \text{ или } I_{z(p)} = I_{z(p)\text{max}}. \quad (4)$$

Реализация алгоритма регулирования позволяет оценить сравнительную эффективность работы устройств по уровню

напряжения. Результаты имитационного моделирования получены для следующих вариантов:

- на тяговых подстанциях и посту секционирования отсутствуют устройства регулирования напряжения (базовый);

- на тяговых подстанциях межподстанционной зоны применяются устройства стабилизации напряжения (для моделирования принят уровень стабилизации – 3500 В);

- на тяговых подстанциях устройства стабилизации напряжения отсутствуют, а на посту секционирования – применяется (уставки работы СНЭЭ для моделирования – снижение ниже уровня напряжения 3300 В – включение на разряд, повышение выше уровня 3500 В – включение на заряд);

- устройства стабилизации применяются на тяговых подстанциях и посту секционирования (уставки регулирования не изменяются, напряжение стабилизации – 3500 В).

Нагрузка электроподвижного состава для рассматриваемого диапазона моделирования задается случайным образом (рис. 5).

Показатели графиков нагрузки электроподвижного состава приведены в табл. 1.

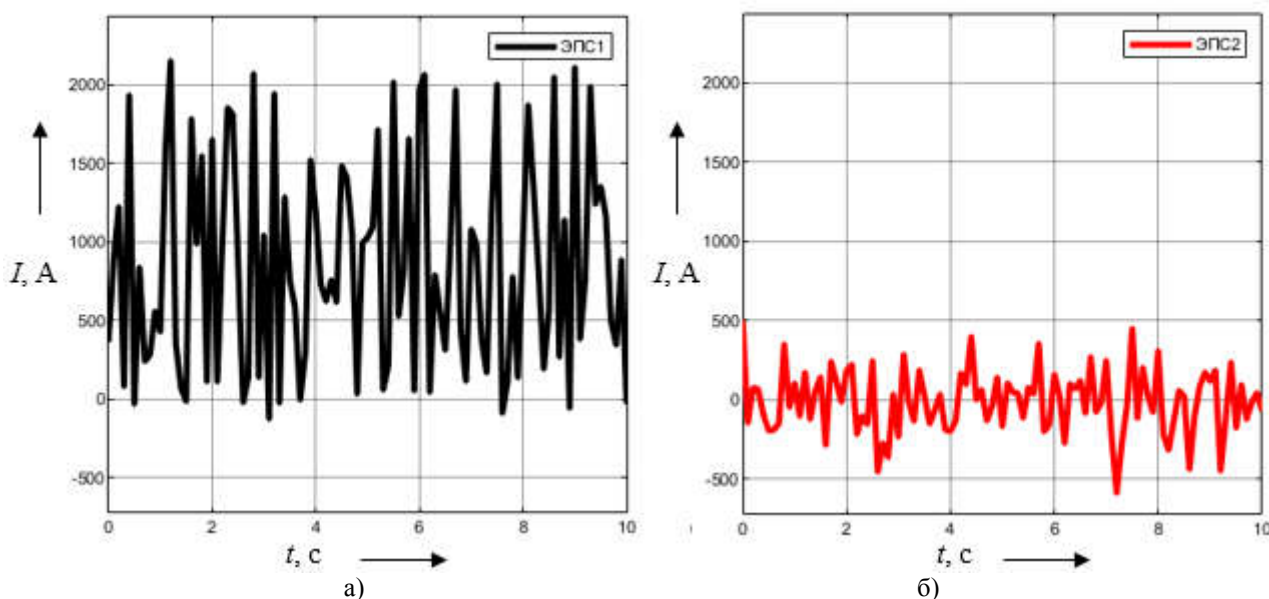


Рис. 5. Нагрузка электроподвижного состава: а – ЭПС1; б – ЭПС  
 Fig. 5. Load of the electric rolling stock: a – EPS1; b – EPS

Характеристика исходного графика тока нагрузки электроподвижного состава

Table 1

*Characteristics of the initial load current graph of an electric rolling stock*

Показатель графика	Ток ЭПС1, А	Ток ЭПС2, А
Максимум	2 155	500
Минимум	-1 273	-585
Диапазон	2 282	1 089
Среднее	856	1 109
СКО	1 092	2 021

Результаты расчета для четырех вариантов рассматриваемых вариантов приведены на рисунке 6. Статистические по-

казатели полученных графиков напряжения для рассмотренных вариантов приведены в табл. 2.

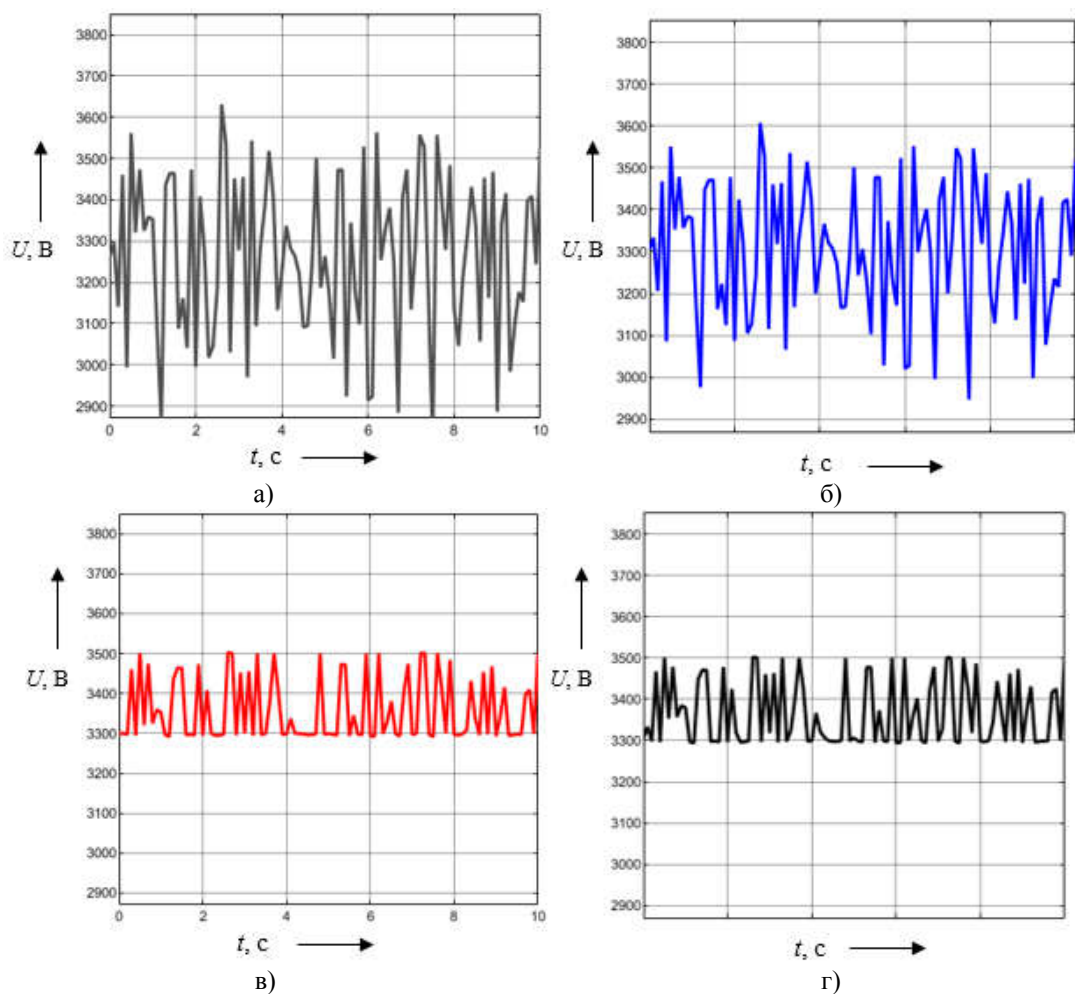


Рис. 6. Напряжение на шинах поста секционирования: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; г – вариант 4

*Fig. 6. Voltage on the busbars of the sectioning station: a – option 1; b – option 2; c – option 3; d – option 4*

Относительно базового варианта среднее напряжение на шинах поста секционирования для вариантов 2 – 4 выше на 1 – 3%. Моделирование выполнено для одной тяговой нагрузки (рис. 7). Статисти-

ческие показатели графиков нагрузки СНЭЭ приведены в табл. 3. Средняя мощность, реализуемая СНЭЭ для вариантов 3 и 4, сопоставима и отличается менее чем на 3%.

## Показатели расчетного графика напряжения на посту секционирования

Table 2

*Indicators of the calculated voltage graph at the sectioning station*

Показатель графика	Напряжение, В (о.е.)			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Максимум	3631 (1,0)	3607 (0,99)	3502 (0,96)	3502 (0,96)
Минимум	2824 (1,0)	2947 (1,04)	3291 (1,17)	3293 (1,17)
Диапазон	807 (1,0)	660 (0,82)	211 (0,26)	209 (0,26)
Среднее	3268 (1,0)	3310 (1,01)	3359 (1,03)	3367 (1,03)
СКО	3273 (1,0)	3314 (1,01)	3360 (1,03)	3368 (1,03)

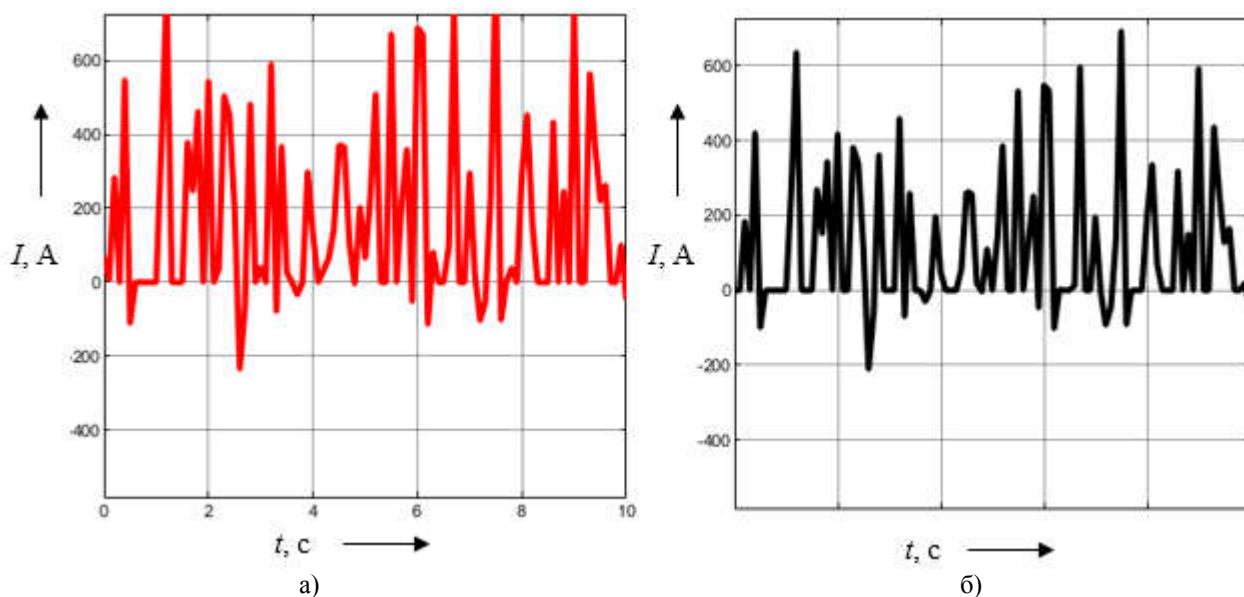


Рис. 7. Ток нагрузки СНЭЭ: а – вариант 3; б – вариант 4

Fig. 7. SNEE load current: a – option 3; b – option 4

## Показатели расчетного графика тока нагрузки СНЭЭ

Table 3

*Indicators of the load current design chart of electric power storage systems*

Показатель графика	Ток нагрузки СНЭЭ, А	
	Вариант 3	Вариант 4
Максимум	850	692
Минимум	-243	-211
Диапазон	1084	903
Среднее	166	114
СКО	293	222

**Результаты**

Сравнение вариантов размещения устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях и посту секционирования контактной сети показывает, что при одновременном регулировании напряжения на тяговых подстанциях и посту секционирования результаты аналогичны при регулировании только на посту секционирования (варианты 3 и 4). При сравнении

токовых нагрузок СНЭЭ на посту секционирования для варианта 3 среднее значение тока нагрузки составляет 98 % от вариант 4, т.е. незначительно снижается. Регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций оказывает влияние на уровень напряжения на посту секционирования (вариант 2), которое проявляется в меньшей степени по сравнению с вариан-



тами размещения СНЭЭ на посту секционирования (варианты 3 и 4), поскольку для варианта 2 повышение минимального уровня напряжения от базового составляет

### Заключение

Приведенные в статье структурная схема и разработанная имитационная модель межподстанционной зоны позволяют выполнить оценку работы устройств регулирования напряжения в контактной сети для различных вариантов их размещения и параметров используемых устройств. Полученные результаты согласуются с ранее полученными результатами регулирования напряжения с помощью СНЭЭ с различными внешними характеристиками [10]. Полученные результаты моделирования показывают эффективность регулирования напряжения с помощью СНЭЭ, размещенного на шинах поста секционирования, по сравнению с вариантами регулирования напряжения на тяговых подстанциях. Эффект стабилизации напряжения для указанных вариантов оказывается сопоставимым, а средняя

4 %, а при регулировании СНЭЭ на шинах поста секционирования для вариантов 3 и 4...17 %.

мощность СНЭЭ для двух вариантов применения отличается незначительно, менее 3 %.

Перспективными исследованиями в области совершенствования систем автоматического регулирования систем накопления электроэнергии являются: разработка систем автоматического регулирования с учетом показателей и остаточного ресурса работы системы накопления электроэнергии; разработка схемных решений выпрямительно-инверторных преобразователей; применение систем накопления электроэнергии для решения задач по ограничению перегрузки силового оборудования; регулирование напряжения и мощности в системах тягового электроснабжения с помощью устройств регулирования, в том числе за счет средств компенсации реактивной мощности; повышение показателей качества электроэнергии на шинах подстанций.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ветлугина О. И. Определение вероятностных характеристик выпрямленного напряжения тяговых подстанций с учетом ступенчатого автоматического регулирования АРН / О. И. Ветлугина, А. А. Пышкин // Инновационный транспорт. 2016. № 4(22). С. 62-65. – DOI 10.20291/2311-164X-2016-4-62-65.
2. Герман Л. А. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Электричество. 2014. № 9. С. 23-33.
3. Аржанников Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций / Б. А. Аржанников, А. А. Пышкин; Б. А. Аржанников, А. А. Пышкин; Уральский гос. ун-т путей сообщ. – Екатеринбург: [Изд-во Уральского гос. ун-та путей сообщ.], 2006. 116 с. – ISBN 5-94614-032-9.
4. Бадер М. П. Исследование влияния устройств регулирования напряжения тяговой подстанции постоянного тока на смежные устройства / М. П. Бадер, В. П. Семенчук, В. Г. Сыченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2009. № 26. С. 39-42.
5. Низов А.С. Режимы работы полупроводниково-вольтодобавочного устройства для регулирования напряжения на тяговых подстанциях / А. С. Низов, А. Н. Штин, К. Г. Шумаков, Д. В. Лесников // Инновационный транспорт. 2022. № 4(46). С. 58-64. – DOI 10.20291/2311-164X-2022-4-58-64.
6. Плотников Ю. В. Пути совершенствования режимов работы тяговых подстанций постоянного тока / Ю. В. Плотников // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 59-62.
7. Герман Л. А. Техничко-економіческіе показате́ли статического генератора реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети железной дороги / Л. А. Герман, К. В. Галкин // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 3(23). С. 84-100. – DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_84.
8. Незевак В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока / В. Л. Незевак // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2022. Т. 81, № 1. С. 38-52. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52.
9. Кацай А. В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Электротехнические си-

стемы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 10-20. – DOI 10.18503/2311-8318-2023-1(58)-10-20.

10. Незевак В. Л. Моделирование процессов регулирования напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного тока с помощью устройств накопления электроэнергии / В. Л.

Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. 2024. № 1 (57). С. 32-44.

11. Nezevak V. L. Simulation of the operation of a traction power supply system with various types of electrical energy storage devices / V. L. Nezevak // Vol. 471, 2024. P. 02002. – DOI 10.1051/e3sconf/202447102002.

## REFERENCES

1. Vetlugina OI, Pyshkin AA. Determination of probabilistic characteristics of rectified voltage of traction substations, taking into account stepwise automatic ARN regulation. *Innovatsionny Transport*. 2016;4(22):62-65. DOI 10.20291/2311-164X-2016-4-62-65.
2. German LA, Kishkurno KV. Voltage regulation in the traction AC network of railways. *Electricity*. 2014;9:23-33.
3. Arzhannikov BA, Pyshkin AA. Improvement of DC power supply system based on automatic voltage regulation of traction substations. Yekaterinburg: Ural State University Railway Transport; 2006.
4. Bader MP, Semenchuk VP, Sychenko VG. Study of the influence of voltage regulation devices of DC traction substation on adjacent devices. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2009;26:39-42.
5. Nizov AS, Shtin AN, Shumakov KG, Lesnikov DV. Operating modes of a semiconductor voltage-boosting device for voltage regulation at traction substations. *Innovatsionny Transport*. 2022;4(46):58-64. DOI 10.20291/2311-164X-2022-4-58-64 .
6. Plotnikov YuV. Ways to improve the operating modes of DC traction substations. *Nauka I Obrazovanie Transportu*. 2021;2:59-62.
7. German LA, Galkin KV. Technical and economic indicators of static var generator at railway traction networks sectioning post. *Smart Electrical Engineering*. 2023;3(23):84-100. DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_84.
8. Nezevak VL. Comparison of energy parameters of electric storage systems for DC and AC traction power supply systems. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):38-52. DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52.
9. Katsay AV, Shevlyugin MV. Excessive recovery disposal in the contact network of electric vehicles when charging a stationary storage device. *Electro-technical Systems and Complexes*. 2023;1(58):10-20. DOI 10.18503/2311-8318-2023-1(58)-10-20.
10. Nezevak VL. Modeling of voltage regulation processes in DC traction power supply systems using electric power storage devices. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024;1(57):32-44.
11. Nezevak VL. Simulation of the operation of a traction power supply system with various types of electrical energy storage devices. 2024;471:02002. DOI 10.1051/e3sconf/202447102002.

## Информация об авторе:

**Незевак Владислав Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, тел. (3812) 44-39-23, Scopus-Author ID 57221356495, Research-ID-Web of Science B-5264-2017, Author-ID-РИНЦ 393961.

**Nezevak Vladislav Leonidovich** –Candidate of Technical Sciences Associate Professor, phone: (3812) 44-39-23, Scopus-author ID 57221356495, Research-ID-Web of Science B-5264-2017, Author ID-GIC 393961.

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 11.12.2024; одобрена после рецензирования 29.01.2025; принята к публикации 30.01.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 11.12.2024; approved after review on 29.01.2025; accepted for publication on 30.01.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**