

## Транспорт

УДК 621.311

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-8-46-60

В.Л. Незевак

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ АКТИВНОГО ПОСТА СЕКЦИОНИРОВАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрены вопросы применения системы накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения для повышения уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Получена оценка изменения уровня напряжения на основе результатов имитационного моделирования и статистической обработки результатов работы системы накопления электроэнергии в режимах заряда и разряда на посту секционирования.

Получены результаты для двух расчетных вариантов – применения и отсутствия рекуперативного торможения и позволяют оценить изменение распределения напряжения.

**Ключевые слова:** система, электроснабжение, тяговая подстанция, пост, секционирование, рекуперативное торможение, накопление, напряжение, характеристика.

V.L. Nezevak

### ASSESSMENT OF ENERGY ACCUMULATION SYSTEM IMPACT UPON VOLTAGE LEVEL ON BUSES OF ACTIVE POINT OF DC SECTIONING

The work purpose is to estimate and investigate processes of the regenerative braking impact upon a voltage level on object buses of the system of traction power supply at electricity storage systems.

In the investigation there are used methods of imitation modeling and analytical ones allowing the fulfillment of calculations for different conditions of the electric traction load formation within the limits of inter-substation areas under consideration.

The work novelty consists in the approach to the estimation of the working mode impact of electricity storage systems upon the voltage level on buses of the objects of traction power supply under conditions of regenerative braking and charge characteristics changes.

In the course of the investigation there are obtained the following results: the work cyclicity change estimation of a storage system is carried out; the dependence of a charge depth change upon rated power

consumption is defined; charge characteristics for conditions of charge predominance in the diagram are calculated; the character of voltage changes on object buses of the system of traction power supply is defined; the necessity of charge characteristic adaptation depending on conditions of regenerative braking use is defined.

The regenerative braking use makes an impact upon charge characteristics formed from the condition of charge predominance in the diagram of a charge degree at the rated interval and allows increasing currents of the second stage of the charge characteristics allowing the decrease voltage loss at charge realization caused by adjacent traction substations at the first stage.

**Key words:** system, power supply, traction substation, point, sectioning, regenerative braking, accumulation, voltage, characteristics.

#### Введение

Одним из направлений повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения является применение систем накопления электроэнергии. Технологии хранения энергии позволяют подойти к решению задач повышения про-

пускной способности лимитирующих участков, повышения эффективности применения и использования энергии рекуперации, повышения качества электроэнергии, надежности электроснабжения и энергетической эффективности перевозок на

электрической тяге, снижению затрат на электроэнергию при работе на рынке электроэнергии и др.

Работы, выполненные отечественными и зарубежными исследователями в области влияния систем накопления на уровень эффективности электроэнергетических систем и систем электроснабжения различного назначения, позволяют обозначить ряд потенциальных эффектов от применения технологий хранения энергии.

Спектр задач, для решения которых рассматриваются системы накопления электроэнергии, достаточно обширен – от оценки параметров систем накопления для работы на энергетическом рынке [1], с системами возобновляемой энергетики [2], в распределительных сетях [3], на транспорте и в других сферах [4-6]. Отечественными исследователями разрабатываются вопросы применения систем накопления для решения задач на железнодорожном транспорте, объектами внедрения которых являются: электроподвижной состав [7-10], тяговая подстанция [11-13], линейные устройства контактной сети и др. [13-17].

Среди различных аспектов применения систем накопления электроэнергии одним из основных является оценка их влияния на показатели работы системы тягового электроснабжения. Частным вопросом указанной тематики является ис-

### **Постановка задачи**

При решении задачи по исследованию режимов работы требуется оценить влияние зарядной характеристики на уровень напряжения, определить характер изменения напряжения в зависимости от условий рекуперативного торможения

### **Условия работы систем накопления**

Решение задачи по повышению пропускной способности связано с ликвидацией лимитирующих факторов, к которым относятся: напряжение на токоприемнике электроподвижного состава, коэффициенты загрузки силового оборудования, температуры нагрева проводов, тросов и оборудования. В настоящее время разработаны различные технические решения по снятию ограничений на лимитирующих пропускную способность участков. Одни-

следование вопросов влияния зарядных характеристик систем накопления на уровень напряжения на шинах тяговых подстанций и линейных устройств контактной сети. Решение указанной задачи позволяет оценить совместимость работы систем и использовать основные выводы при разработке алгоритмов работы систем накопления, настройке режимов, выбора пороговых напряжений и токов стабилизации.

Применение систем накопления в тяговом электроснабжении позволяет повысить пропускную способность на лимитирующих участках железных дорог, а также энергетическую эффективность перевозок. Указанное направление относится к одному из важнейших направлений работы, целью которого является повышение эффективности работы холдинга ОАО «РЖД». К приоритетным задачам энергетической стратегии ОАО «РЖД» относится полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса, значительное снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов. Для реализации указанных задач ОАО «РЖД» предусмотрено внедрение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения. В связи с вышеуказанным решение задач по исследованию различных режимов работы систем накопления электроэнергии является актуальным.

электроподвижного состава. На основе имитационного моделирования получить результаты, позволяющие оценить характер изменения напряжения в условиях работы системы накопления на шинах поста секционирования постоянного тока.

ми из указанных мероприятий на участках постоянного тока является создание активных постов секционирования, на участках переменного тока – размещение средств компенсации реактивной мощности.

При реализации активных постов секционирования, позволяющих эффективно решать задачу по поддержанию уровня напряжения на токоприемнике, рассматриваются решения, связанные со

строительством питающей линии постоянного или переменного тока. Одним из перспективных решений является применение систем накопления при их размещении на линейных устройствах контактной сети (постах секционирования, пунктах параллельного соединения).

Расчеты пропускной способности для выбора параметров системы тягового электропитания и определения показателей работы выполняются без учета рекуперативного торможения с целью проведения расчетов для наиболее тяжелого режима работы. Эффективность выбора параметров устройств системы тягового электропитания оценивается по перечню показателей нагрузочной способности, одним из которых является коэффициент загрузки тяговой сети по уровню напряжения:

$$k_{3U} = \frac{U_{xx} - U_{\min}^{3\text{мин}}}{U_{xx} - U_{\text{доп}}^{3\text{мин}}}, \quad (1)$$

где  $U_{xx}$  – среднее напряжение холостого хода подстанций, питающих межподстанционную зону, В;  $U_{\min}^{3\text{мин}}$  – минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава на интервале усреднения 3 мин, В;  $U_{\text{доп}}^{3\text{мин}}$  – минимально допустимый уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, В.

Решение задачи поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике позволяет определить параметры системы накопления электроэнергии, зависящие от фактического и минимального уровня напряжения на шинах объекта и коэффициента загрузки по напряжению:

$$\begin{cases} X = F(U_{\text{ш}m}, U_{\text{ш} \min}, k_{3U}) \\ X = \{x_i, i = 1 \dots N_n\} \\ \forall m \in N_j: U_{\text{ш}m} - U_{\text{ш}m \min} > 0 \\ \forall n \in N_{jk}: k_{3U_n} < 1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{\text{ш}m}$ ,  $U_{\text{ш} \min}$  – фактическое и минимально допустимое напряжение на шинах объекта  $m$ , определяемое по заданным интервалам усреднения, В;  $X$  – вектор параметров системы накопления электроэнергии размерностью  $N_n$ ;  $m$  – линейный объект или тяговая подстанция, входящие в  $j$ -ю рассматриваемую межподстанционную зону множества  $N_j$ ;  $n$  – локомотив или моторвагонный подвижной состав, входящий в  $k$ -ю группу электроподвижного состава, следу-

ющую по  $j$ -й межподстанционной зоне из множества  $N_{jk}$ .

К основным параметрами систем накопления относят:

- ток (мощность) в режиме заряда и разряда;
- энергоемкость;
- глубину разряда в процессе работы;
- допустимый уровень деградации аккумуляторов;
- количество циклов разряд/заряд до достижения допустимого уровня деградации;
- уровень напряжения.

При определении тока (мощности) в режиме разряда и цикличности работы определяющим фактором выступает электротяговая нагрузка в месте размещения системы накопления. Другие параметры системы определяются исходя из необходимости обеспечения времени заряда системы и максимального ресурса работы системы. Определение указанных параметров в большей степени относится к электрохимическому виду накопителей, например, литий-ионным аккумуляторам.

Заряд системы накопления приводит к появлению дополнительных потерь напряжения в тяговой сети. В этом случае ток заряда ограничивается минимальным напряжением на шинах подстанции или линейного устройства (объекта) с системой накопления. Максимальное значение тока заряда  $I_{3 \max}$  должно удовлетворять условию:

$$I_{3 \max} \leq \frac{U_{\max} - U_{\min}}{r_{к.с}}, \quad (3)$$

где  $U_{\max}$  – максимальное напряжение на шинах объекта в режиме заряда;  $U_{\min}$  – минимальное допустимое напряжение на шинах объекта в режиме заряда по условиям пропуска поездов;  $r_{к.с}$  – сопротивление секции контактной сети от тяговой подстанции до поста секционирования.

После выбора значения  $I_{3 \max}$  ток подзаряда  $I_3$  системы накопления для стабилизации напряжения на шинах объекта при  $U_{\text{ш}i} > U_{\min}$  в  $i$ -й момент времени (при  $U_{\text{пс}i} \leq U_{\min}$  принимается, что  $I_3 = 0$ ) определяется по формуле:

$$I_{3i} = \frac{U_{\text{ш}i} - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot I_{\max}, \quad (4)$$

где  $U_{ш i}$  – фактическое напряжение на шинах объекта в  $i$ -й момент времени.

Работа систем накопления при решении задачи поддержания уровня напряжения определяется выбором диапазонов порогового напряжения на шинах объекта для различных режимов [20]. В зависимости от изменения напряжения на шинах поста секционирования следует рассматривать четыре основных режима работы системы накопления, приведенных для примера на рис. 1:

– «разряд» – включение при снижении напряжения до уровня  $U_{разр\ вкл}$  (3000 В), выключение – при достижении уровня  $U_{разр\ выкл}$  (3200 В);

– «ожидание» – при изменении напряжения на шинах поста секциониро-

вания в диапазоне соответствующих значений для режима «разряд» и «подзаряд» (ток системы накопления отсутствует: а) в диапазоне напряжения от 3200 до 3250 В; б) в диапазоне напряжения от 3000 до 3200 В при условии снижения напряжения до  $U_{разр\ вкл}$ ;

– «подзаряд» (первая ступень) – режим заряда токами, определяемыми зарядной характеристикой системы (от уровня  $U_{подз\ нач}$  (3250 В) до уровня  $U_{подз\ кон}$  (3600 В));

– «заряд» (вторая ступень) – в диапазоне значений напряжения выше  $U_{подз\ кон}$  номинальными токами системы для обеспечения приема энергии рекуперации (500 А при напряжении выше уровня 3600 В).

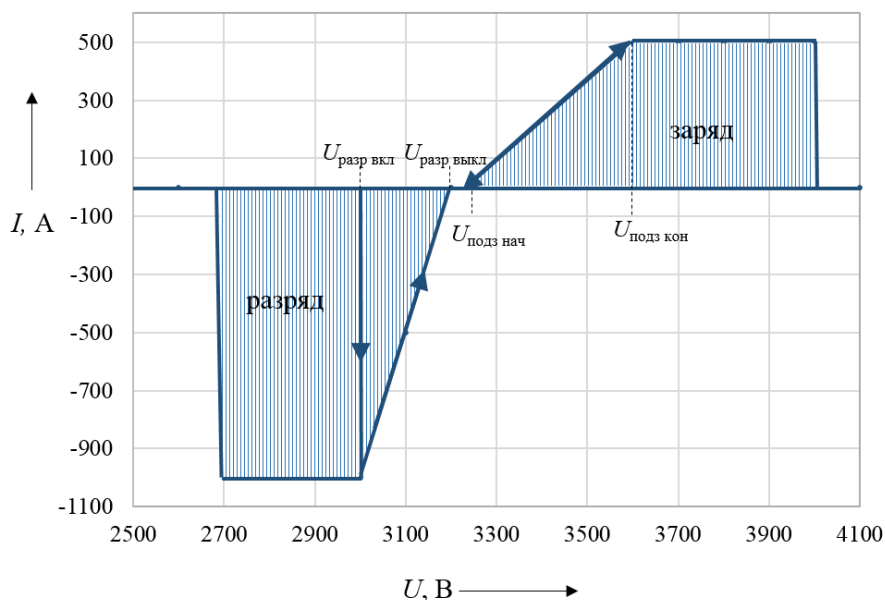


Рис. 1. Внешняя характеристика системы накопления

Наиболее часто рассматриваемыми видами накопителей для построения систем накопления электроэнергии на транспорте являются системы, построенные по различной топологии на основе литий-ионных аккумуляторов, и гибридные системы, в которых используются электрохимические и электрические виды накопителей. Различие характеристик литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов позволяет использовать их для компенсации быстрых и медленных изменений напряжения и мощности. Максимальный ток в режимах заряда и разряда аккумуляторной батареи определяется типом аккумуляторов. Для

литий-железо-фосфатных аккумуляторов рекомендуемый изготовителями ток заряда изготовителей не должен превышать 50 % от допустимого тока разряда. Соотношение токов разряда и заряда относительно их номинальной емкости, определяемое как  $2C_n$  и  $1C_n$  соответственно, позволяет оценить необходимую мощность и энергоемкость системы. Так, для номинального тока заряда 500 А токи разряда составят 1000 А, а мощность системы 1,5/3,0 МВт соответственно, энергоемкость системы исходя из часового продолжительного режима принимается не менее 1500 кВт·ч.

Необходимо отметить, что фактическая продолжительность эпизодов заряда и разряда существенно ниже часа. Как показывает обработка данных регистраторов параметров движения электроподвижного состава различных серий и проведенные расчеты средняя продолжительность заряда в зависимости от условий участка же-

лезной дороги, как правило, не превышает 10 мин, разряда – 30 мин [19, 21]. Указанная продолжительность работы системы накопления в режиме заряда меньше, чем в режиме разряда, что является особенностью, присущей системам с электротяговой нагрузкой.

### Моделирование работы систем накопления без рекуперативного торможения

Проведение расчетов по определению энергетических показателей системы тягового электроснабжения и системы накопления выполняется на основе схем замещения, позволяющих реализовать рассмотренные выше режимы работы, как это показано в [21].

Результаты имитационного моделирования, полученные для двух межподстанционных зон двухпутного участка Свердловской железной дороги – МПЗ1 и МПЗ2, полученные для условий пакетного пропуска поездов по расчетной схеме «Н-с-с-с» (Н – поезд наибольшей массы, с – поезд средней массы), позволяют построить график изменения напряжения на шинах смежных тяговых подстанций и постов секционирования. Расчетными условиями для первого варианта расчетов является

режим отсутствия рекуперативного торможения на рассматриваемых участках.

Оценка работы систем накопления электроэнергии на лимитирующих межподстанционных зонах в условиях переменной тяговой нагрузки и смены режимов работы электроподвижного состава выполняется на основе полученных при моделировании графиков изменения напряжения на шинах постов секционирования и токов накопителя. Результаты изменения напряжения на шинах постов секционирования и токов систем накопления получены на основе мгновенных расчетных схем для двухчасового интервала графика движения поездов и для режима разряда при варианте размещения на постах секционирования ПС1 и ПС2 приведены на рис. 2 соответственно.

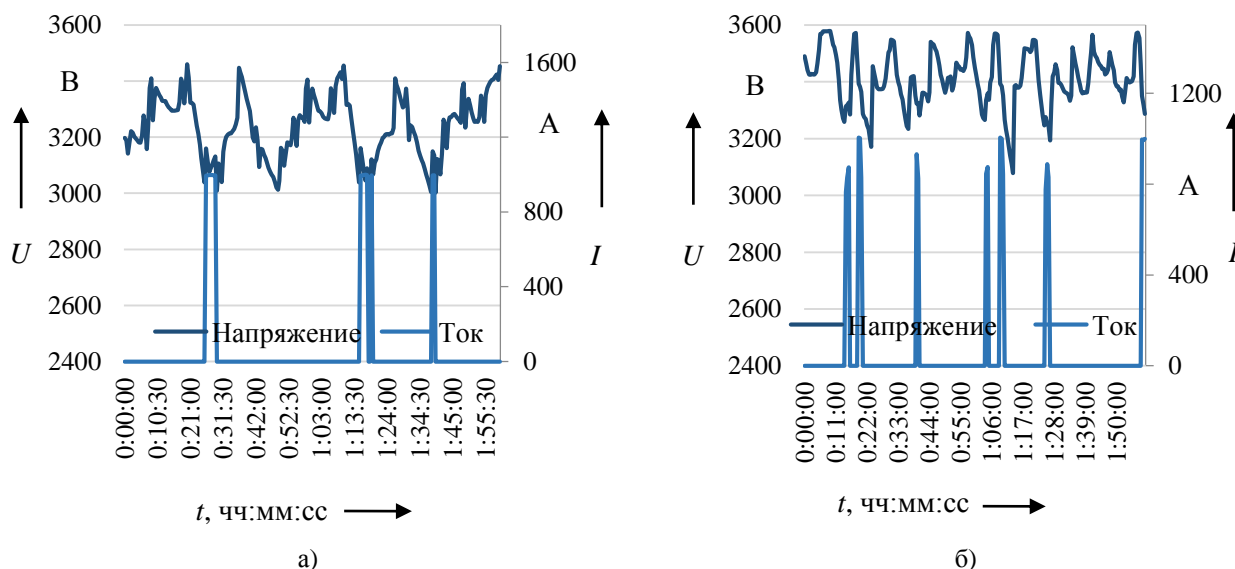


Рис. 2. График напряжения на шинах и нагрузки системы накопления в режиме разряда: а – ПС1, б – ПС2

Степень заряженности накопителя на  $k$ -м интервале времени определяется с учетом коэффициента полезного действия  $\eta$ , учитывающего эффективность работы

схемы преобразования и аккумуляторной батареи, по формуле:

$$SoC_k = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} u_k i_k \Delta t_k}{W_{НЭЭ}} 100\eta, \quad (5)$$

где  $u_k$ ,  $i_k$  – значения напряжения и тока для  $k$ -го интервала времени;  $\Delta t_k$  – интервал времени расчетов;  $W_{НЭЭ}$  – номинальная энергоёмкость накопителя электроэнергии.

При расчетах степени заряженности принято, что коэффициент полезного действия системы накопления, включающей в себя преобразователи, составляет 0,9. Графики степени заряженности для систем накопления и соответствующие им зарядные характеристики, обеспечивающие формирование характеристик с преобладанием заряда, и графики изменения глубины разряда от номинальной энергоёмкости приведены на рис. 3.

Глубина разряда накопителя электроэнергии рассчитывается по полученным значениям степени заряженности на расчетном интервале:

$$DoD = SoC_{\max} - SoC_{\min}, \quad (6)$$

где  $SoC_{\max}$  и  $SoC_{\min}$  – максимальное и минимальное значение степени заряженности, полученное на расчетном интервале.

Представленные результаты расчета степени заряженности получены из условия, что начальная степень заряженности равна 75 %, а номинальная энергоёмкость системы составляет 1500 кВт·ч. Принятые исходные данные позволяют оценить глубину разряда  $DoD$  для ПС1 – 12 % и ПС2 – 9 %. Результаты моделирования глубины

разряда представлены с помощью функций аппроксимации, в качестве которых использованы степенные функции. На рис. 3 д и е приведены полученные функции и соответствующий коэффициент детерминации  $R^2$ .

Для системы накопления в условиях работы на ПС1 максимальный уровень тока заряда составляет 400 А, для ПС2 – 160 А. Указанные уровни токов обеспечивают преобладание заряда в графике степени заряженности на двухчасовом расчетном интервале, а токи находятся в пределах допустимого тока заряда для аккумуляторной батареи с номинальной мощностью 1500 кВт.

Графики изменения нагрузки систем накопления на постах секционирования ПС1 и ПС2 приведены на рис. 4. Основные статистические показатели для напряжения на шинах и нагрузки систем накопления приведены в табл. 1.

Применение рекуперативного торможения электроподвижным составом в границах межподстанционных зон существенным образом изменяет условия работы систем накопления электроэнергии на постах секционирования. С целью оценки влияния рекуперативного торможения для сравнения условий работы систем накопления в условиях применения или отсутствия рекуперативного торможения выполнены расчеты для соответствующих вариантов. Расчетным участком является участок Свердловской железной дороги, на котором расположены рассматриваемые посты секционирования.

### Моделирование работы систем накопления при рекуперативном торможении

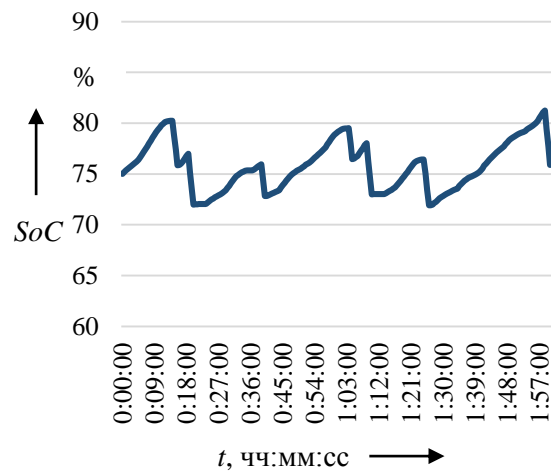
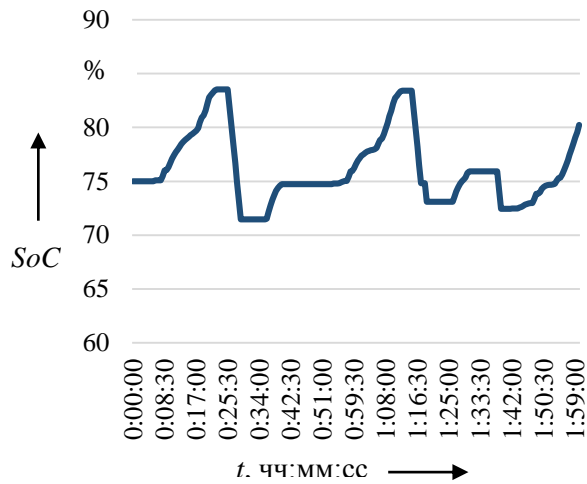
Применение рекуперативного торможения электроподвижным составом оказывает влияние на режимы и показатели работы систем накопления и тягового электроснабжения. Для оценки влияния данного фактора на изменение напряжения с учетом зарядной характеристики имитационного моделирования взаимодействия системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава выполнено для аналогичных условий – при пакетном пропуске поездов по расчетной схеме «Н-с-с». Полученные результаты позволяют построить графики изменения степени заря-

женности и соответствующей зарядной характеристики, глубины разряда для условий работы систем накопления на рассматриваемых постах секционирования ПС1 и ПС2 приведены на рис. 5 соответственно.

Сравнение графиков нагрузки систем накопления на ПС1 и ПС2 в условиях применения рекуперативного торможения в условиях отсутствия рекуперативного торможения показывает снижение количества эпизодов и продолжительности работы систем накопления в рамках расчетного интервала.

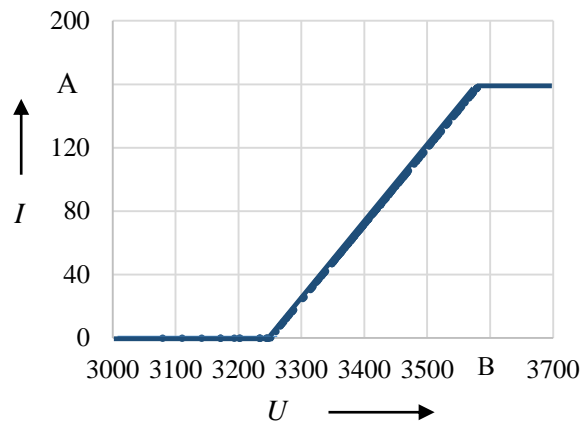
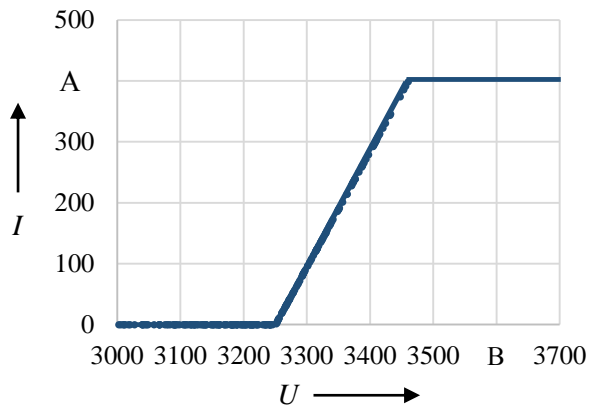
В большинстве случаев (свыше 90 %) ток разряда системы накопления находится в диапазоне значений 0 до 100 А. В остальных случаях расчета ток разряда принимает значения до 1000 А (табл. 1). Применительно к работе системы на ПС1 среднее напряжение на шинах увеличива-

ется (на 3,7 %), средний ток разряда падает более чем в два раза. Аналогичное изменение наблюдается при работе системы на ПС2 – наблюдается увеличение среднего напряжения на шинах (на 1,2 %) и снижение среднего тока устройства (на 43,4 %).



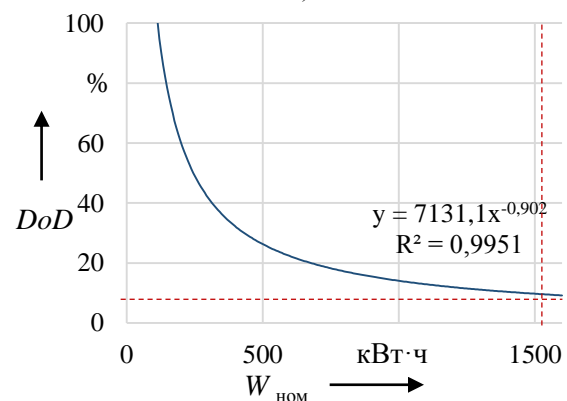
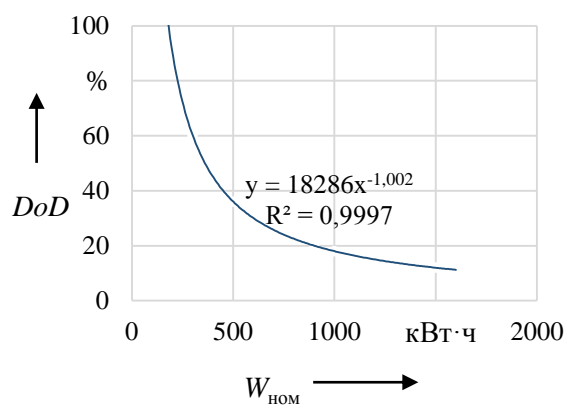
а)

б)



в)

г)



д)

е)

Рис. 3. Графики: а, б – степени заряженности; в, г – зарядной характеристики; д, е – глубины разряда для условий работы систем накопления на ПС1 и ПС2 соответственно в условиях отсутствия рекуперации

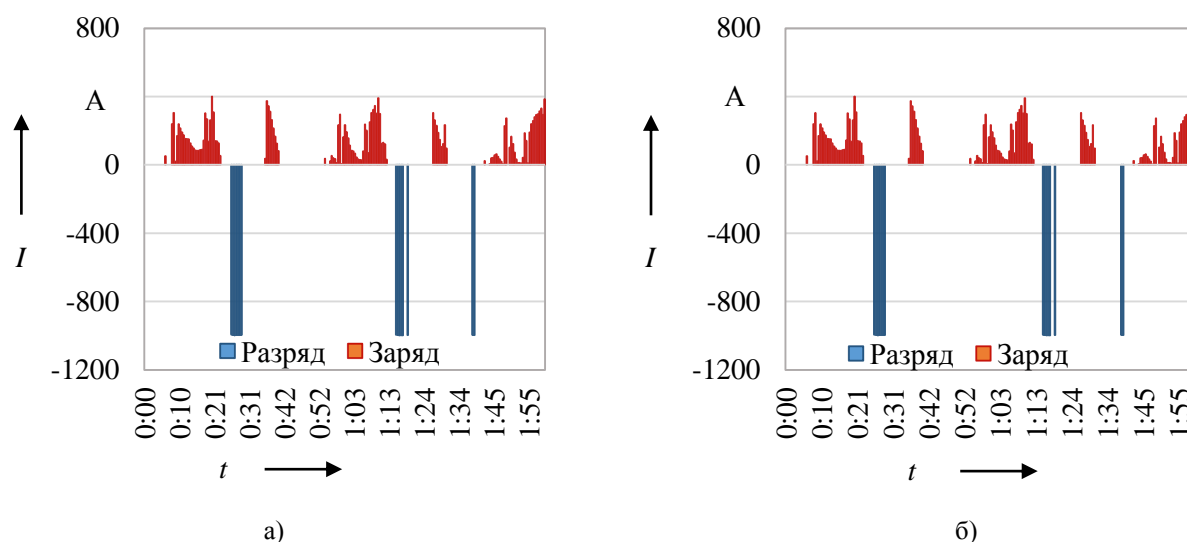


Рис. 4. Графики: а – нагрузки систем накопления при работе на ПС1;  
б – то же при работе на ПС2

Таблица 1

Статистические показатели работы систем накопления на постах секционирования

Значение	Показатель					
	с рекуперацией		без рекуперации		Изменение тока и напряжения	
	$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$
ПС1						
мин	3013,0	0,0	3002,0	0,0	0,4	0,0
макс	3846,0	996,0	3460,0	999,0	10,0	-0,3
среднее	3362,0	16,5	3237,7	62,0	3,7	-275,8
среднее квадратичное отклонение	160,5	127,4	111,7	241,2	30,4	-89,3
ПС2						
мин	3059,0	0,0	3079,0	0,0	-0,7	0,0
макс	3854,0	1004,0	3579,0	1005,0	7,1	-0,1
среднее	3451,5	49,5	3410,2	71,0	1,2	-43,4
среднее квадратичное отклонение	145,0	208,9	98,5	244,3	32,1	-16,9

Расчетные графики изменения степени заряженности, соответствующие им зарядные характеристики, изменение глубины разряда в рамках расчетного периода времени (2 часа) приведены на рис. 6. В отличие от условий работы при отсутствии рекуперативного торможения в данном случае наблюдается снижение тока заряда в диапазоне значений напряжения до напряжения холостого хода. Изменение условий работы системы накопления на ПС1 заключается в снижении цикличности в рамках расчетного времени и существен-

ном снижении тока заряда при снижении напряжения до уровня напряжения холостого хода. Для ПС2 для системы накопления улучшаются условия по поддержанию степени заряженности – в рамках расчетного периода степень заряженности возрастает.

Изменение глубины разряда позволяет оценить расчетное значение номинальной энергоемкости систем накопления для ПС1 и ПС2 для обеспечения условий устойчивой работы различных накопителей электрохимического вида.



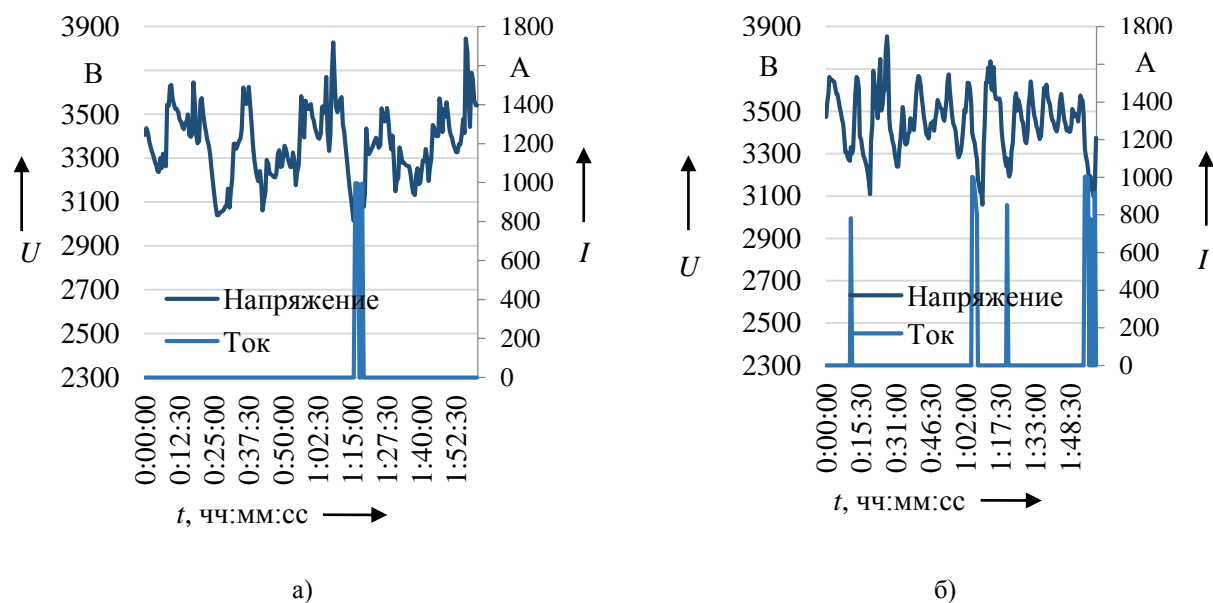


Рис. 5. Графики: а – нагрузки и напряжения системы накопления для условий работы на ПС1; б – в условиях рекуперативного торможения на ПС2

Сравнение изменения глубины разряда для вариантов с наличием и отсутствием рекуперативного торможения (для расчетных условий максимальный ток разряда принят равным 1000 А, пороговое напряжение разряда принято 3000 В) показывает, что для ПС1 номинальная энергоемкость уменьшается с уровня 1200 до 400 кВт·ч, для ПС2 – с уровня 900 до 700 кВт·ч (рис. 6). Графики нагрузки систем накопления на ПС1 и ПС2 приведен на рис. 7.

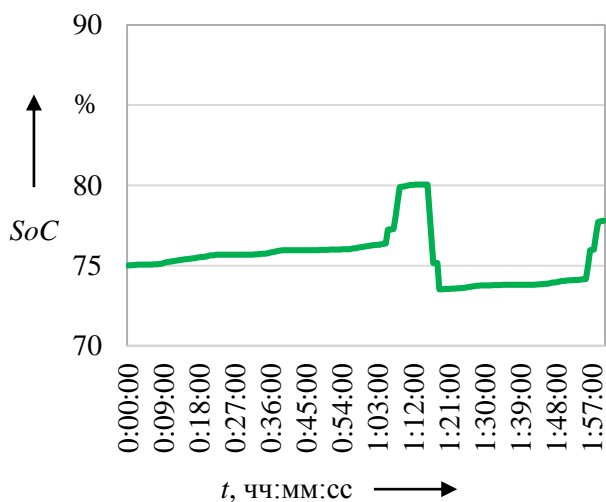
Условия заряда систем накопления на участках применения рекуперативного торможения изменяются в части увеличения токов при повышении уровня напряжения свыше напряжения холостого хода (3600 В). Наличие эпизодов рекуперативного торможения позволяет выполнять заряд максимальными токами и снижать токи заряда при понижении напряжения ниже уровня холостого хода смежных подстанций. Это позволяет снизить потери напряжения в нагрузочном режиме и обеспечить безусловный прием энергии рекуперации при повышении напряжения. Максимальные токи разряда для систем накопления на ПС1 и ПС2 составляют 1000 А, максимальные токи заряда для

первой ступени – 20 и 60 А соответственно, второй – 500 А.

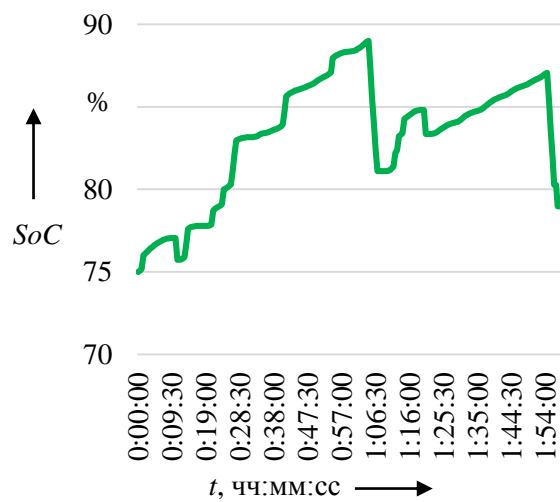
Сравнение расчетных графиков электрической нагрузки, степени заряженности и глубины разряда позволяет сделать вывод о том, что в условиях применения рекуперативного торможения на участке облегчаются условия эксплуатации систем накопления электроэнергии в части снижения глубины разряда, позволяющей увеличить эксплуатационный ресурс работы накопителей электрохимического вида, и соответствующего изменения характеристик заряда и разряда.

Работа системы накопления электроэнергии на шинах постов секционирования оказывает влияние на уровень напряжения в режимах разряда и заряда. В первом случае система накопления повышает уровень напряжения на шинах в области минимальных значений, во втором – понижает уровень напряжения в области максимальных значений за счет падения напряжения от протекающих токов заряда.

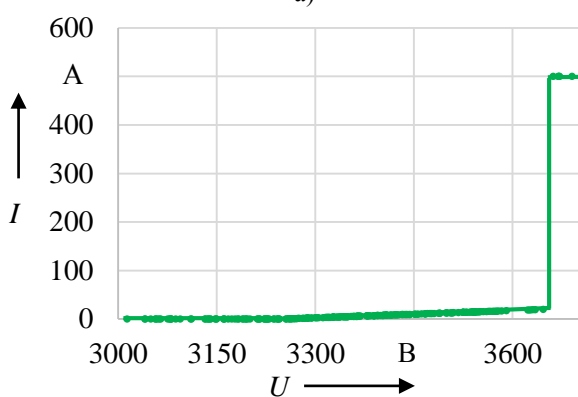
Реализация зарядной характеристики систем накопления на постах секционирования ПС1 и ПС2 позволяет оценить уровень напряжения на шинах и долю потерь напряжения при заряде.



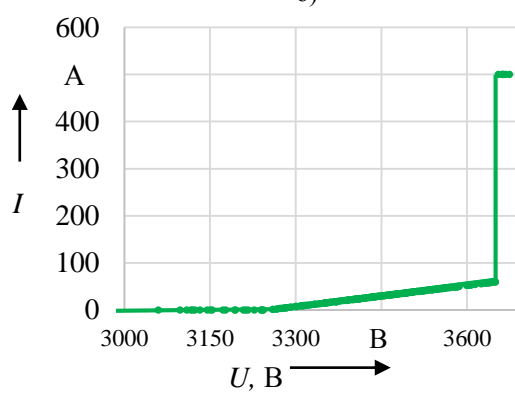
а)



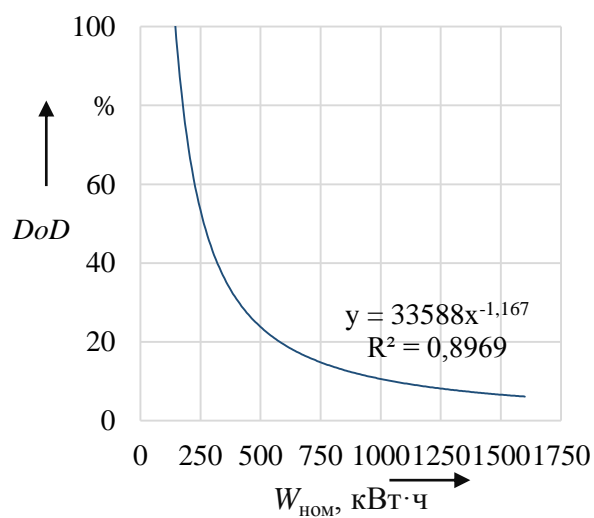
б)



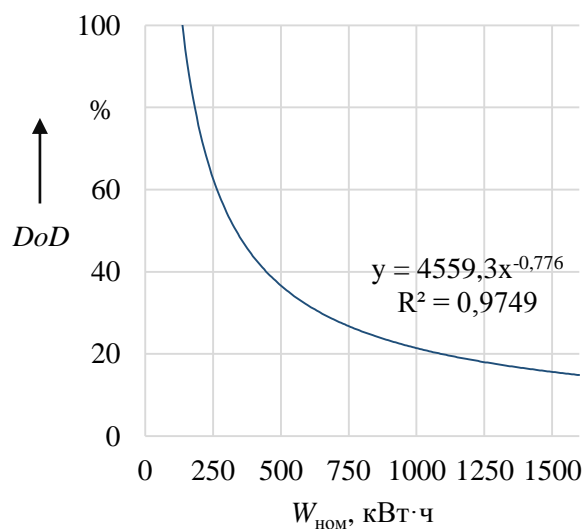
в)



г)



д)



е)

Рис. 6. Графики: а, б – степени заряженности; в, г – зарядной характеристики; д, е – глубины разряда для условий работы систем накопления на ПС1 и ПС2 соответственно в условиях рекуперативного торможения

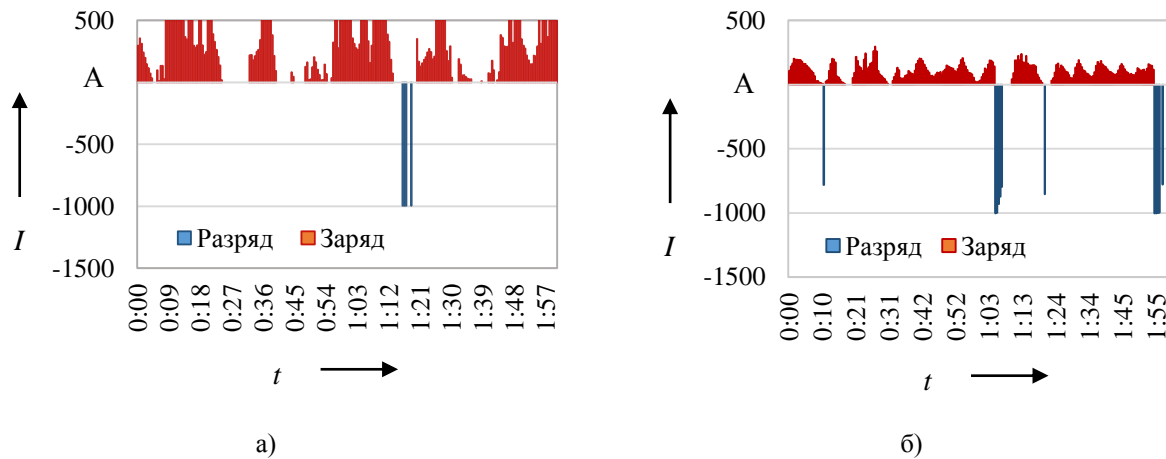


Рис. 7. а - график нагрузки систем накопления для условий работы на ПС1 (а); б - ПС2 в условиях применения рекуперативного торможения

**Оценка потерь напряжения при реализации зарядной характеристики**

Потери напряжения определяются сопротивлением контактной подвески. В границах рассматриваемых зон МПЗ1и МПЗ2 применяется контактная подвеска с усиливающим проводом – 2МФ100+М-120+2А-185. Удельное сопротивление подвески для двухпутного участка составляет в данном случае 18,45 мОм. Расположение поста секционирования от подстанции слева до ПС1 составляет – 13,9 км, от подстанции слева до ПС2 – 10,5 км. Соответствующие расстояниям сопротивления плеч питания контактной сети участка составляют – 193,73 мОм и 256,46 мОм.

Напряжение на шинах поста секционирования при реализации заряда от смежных подстанций уменьшается от уровня базового варианта (без систем накопления) за счет возникновения соот-

ветствующего падения напряжения и определяется по формуле:

$$U_{ш} = U_{ш}^{расч} - i_3 r_0 l, \tag{7}$$

где  $U_{ш}^{расч}$  – расчетный уровень напряжения на шинах поста секционирования без учета реализации заряда по зарядной характеристике;  $i_3$  – ток заряда, определяемый по зарядной характеристике в зависимости от уровня напряжения на шинах поста секционирования;  $r_0$  – удельное сопротивление контактной подвески;  $l$  – протяженность контактной сети от смежной тяговой подстанции до поста секционирования.

Поскольку напряжение холостого хода смежных подстанций в расчетах принимается одинаковым, то отношение токов смежных подстанций при заряде обратно пропорционально сопротивлению плеч питания до поста секционирования:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1} \Rightarrow \text{при } i_3 = i_1 + i_2; \quad i_1 = \frac{r_2}{r_1} i_2 = \frac{r_2}{r_1} (i_3 - i_1), \tag{8}$$

тогда

$$i_1 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} i_3, \tag{9}$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – сопротивления контактной сети от тяговых подстанций слева и справа от поста секционирования соответственно.

С учетом (7) напряжение на шинах поста секционирования определяется следующим образом:

$$U_{ПС} = U_{ПС}^{расч} - i_1 r_1 = U_{ПС}^{расч} - \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} i_3 \tag{10}$$

где  $U_{ПС}^{расч}$  – расчетное значение напряжения на шинах поста секционирования, определенное без учета тока заряда.

Распределение тока заряда между смежными подстанциями осуществляется в зависимости от сопротивления тяговой сети и уровня напряжения на шинах. Упрощенная схема замещения межподстанционной зоны, содержащей систему накопления (источник тока), для определения напряжения на шинах поста секционирования приведена на рис. 8.

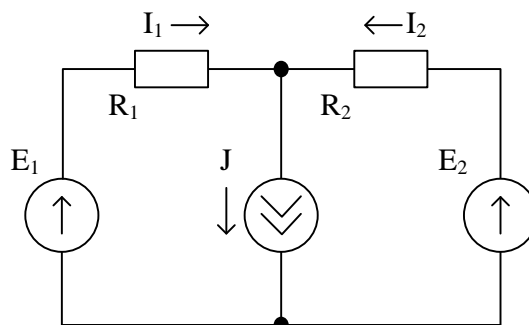


Рис. 8. Схема замещения межподстанционной зоны

Сравнение напряжений для условий заряда систем накопления при работе на посту секционирования ПС1 показывает, что частота наблюдения напряжения выше уровня напряжения холостого хода (в диапазоне от 3600 до 4000 В) существенно снижается, для ПС2 – аналогично снижается в диапазоне от 3600 до 4000 В и увеличивается в диапазоне ниже 3600 В, что положительно сказывается на условиях применения рекуперативного торможения.

Режим заряда систем накопления на рассмотренных постах секционирования

позволяет снизить долю наблюдений напряжения на шинах поста секционирования в диапазоне выше напряжения холостого хода для условий применения рекуперативного торможения. При отсутствии рекуперативного торможения основной эффект работы проявляется в уменьшении доли наблюдения напряжений на шинах в диапазоне минимальных напряжений. В обоих случаях наблюдается эффект стабилизации напряжений в области максимальных и минимальных диапазонов соответственно (рис. 9).

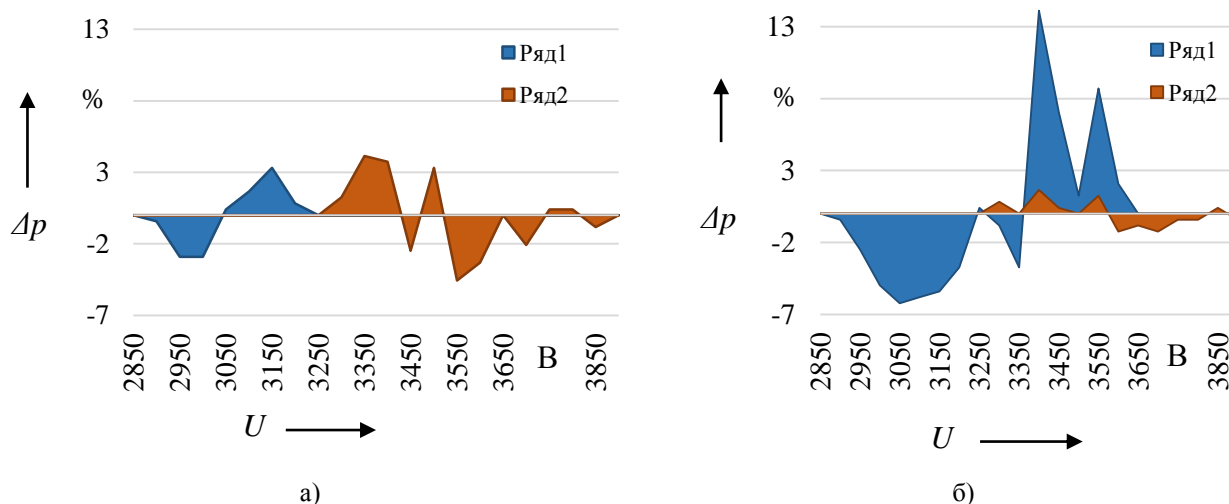


Рис. 9. Изменение частот наблюдения напряжения для случаев отсутствия (ряд 1) и применения (ряд 2) рекуперативного торможения в условиях работы системы накопления: а - на ПС1; б - ПС

## Заключение

Результаты имитационного моделирования в различных условиях на примере размещения систем накопления на постах секционирования позволяют выделить следующие эффекты влияния рекуперативного торможения:

- сокращение количества циклов работы системы накопления в границах рас-

четного интервала, за счет повышения уровня напряжения;

- снижение уровня требуемой номинальной энергоемкости систем накопления и уровня токов подзаряда от смежных тяговых подстанций;

- уменьшение глубины разряда накопителей, что в случае эксплуатации нако-

пителей электрохимического будет оказывать влияние на ресурс работы.

Для условий отсутствия рекуперативного торможения основной эффект проявляется в повышении напряжения в диапазоне минимальных значений, для условий применения рекуперативного торможения – в понижении напряжения на шинах в диапазоне максимальных значений. Применение рекуперативного торможения оказывает влияние на зарядную характеристику, формируемую из условия

преобладания заряда в графике степени заряженности на расчетном интервале, и позволяет увеличить токи второй ступени зарядной характеристики, одновременно позволяя снизить потери напряжения при реализации заряда на первой ступени от смежных тяговых подстанций. Снижение интенсивности рекуперации обуславливает необходимость адаптации угла наклона зарядной характеристики первой ступени в сторону, соответствующую условиям отсутствия рекуперации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lepszy, S.** (2020). Analysis of the storage capacity and charging and discharging power in energy storage systems based on historical data on the day-ahead energy market in Poland. *Energy*, 118815. - doi:10.1016/j.energy.2020.118815.
2. **Dadashi-Rad, M. H.** (2020). Modeling and Planning of Smart Buildings Energy in Power System Considering Demand Response / M. H. Dadashi-Rad, A. Ghasemi-Marzbali, R. A. Ahangar // *Energy*, 118770. doi:10.1016/j.energy.2020.118770.
3. **Mehrjerdi, H.** (2019). Modeling and Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems in Electric Power Distribution Networks / H. Mehrjerdi, R. Hemmati, R // *Journal of Cleaner Production*. - doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.195.
4. **The influence of electric vehicle charging strategies on the sizing of electrical energy storage systems in charging hub microgrids.** (2020). / Haupt, L., Schöpf, M., Wederhake, L., & Weibelzahl, M. // *Applied Energy*, 273, 115231. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115231.
5. **Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system** (2019) / Wanzhong Zhao, Gang Wu, Chunyan Wang, Leiyan Yu, Yufang Li // *Journal of Power Sources*. Vol. № 427. – 2019. – pp. 174 – 183.
6. **Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт** / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, И. Ю. Коротков [и др.] – Текст : Непосредственный // *Энергетическая политика*. - 2020. - № 6 (148). - С. 76-87.
7. **Рябцев, Г. Г.** Показатели эффективности конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена / Г. Г. Рябцев, К. С. Желтов // *Электротехника*. – 2014. – № 8. – С. 47-50.
8. **Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives** / O. S. Valinsky, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. M. Evstaf'ev // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 91. – No 10. – P. 604-608. – DOI 10.3103/S1068371220100119.
9. **Незевак, В. Л.** Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2020. – № 9. – С. 17 – 23.
10. **Буйносов, А. П.** Перспективы использования накопителей электрической энергии на моторвагонном подвижном составе / А. П. Буйносов, М. Г. Дурандин, О. И. Тутьнин // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2020. – № 4 (48). – С. 35 – 45.
11. **Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices** (2020) / M. V. Shevlyugin, A. E. Golitsyna, M. N. Belov, D. S. Pletnev. // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 91. – No 9. – P. 552-556. – DOI 10.3103/S1068371220090114.
12. **Незевак, В. Л.** Оценка эффективности применения систем накопления электроэнергии для обеспечения собственных нужд тяговых подстанций постоянного тока / В. Л. Незевак, С. С. Самолинов, Е. К. Хусаинов // *Материалы IV международной научно-практической конференции в рамках Научно-образовательного форума, Омск, 10 декабря 2020 года*. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 49-56.
13. **Незевак, В. Л.** Применение систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях для обеспечения собственных нужд / В. Л. Незевак // *Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 декабря 2020 года*. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский университет путей сообщения», 2020. – С. 173-178.
14. **Nezevak, V.** (2020). Electric Energy Storage Units Applicability Assessment of Different Kinds in the Conditions of Moscow Central Ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 1115 AISC, Pp. 42 – 51, DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_5.
15. **Nezevak, V.** (2020). Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // *Advances*

- in Intelligent Systems and Computing, 2020, 982, Pp. 524 – 538, DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_50.
16. **Черемисин, В. Т.** Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33 – 44.
  17. **Незевак, В. Л.** Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения с целью повышения пропускной способности на лимитирующих участках / В. Л. Незевак, С. С. Самолинов // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). С. 104-109.
  18. **Черемисин, В. Т.** Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения с гибридными накопителями электроэнергии: монография / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Омск. Омский гос. ун-т путей сообщ., 2019. - 222 с.
  19. **Незевак, В. Л.** Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Мир транспорта. – 2018. – № 2. – С. 84–94.
  20. **Незевак, В. Л.** Влияние пороговых напряжений системы накопления электроэнергии на энергетические показатели тягового электроснабжения / В. Л. Незевак // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 4 (82). – С. 28 – 37.
  21. **Незевак, В. Л.** Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии / В. Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 70–80. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80.
  1. **Lepszy, S.** (2020). Analysis of the storage capacity and charging and discharging power in energy storage systems based on historical data on the day-ahead energy market in Poland. *Energy*, 118815. - doi:10.1016/j.energy.2020.118815.
  2. **Dadashi-Rad, M. H.** (2020). Modeling and Planning of Smart Buildings Energy in Power System Considering Demand Response / M. H. Dadashi-Rad, A. Ghasemi-Marzbali, R. A. Ahangar // *Energy*, 118770. doi:10.1016/j.energy.2020.118770.
  3. **Mehrjerdi, H.** (2019). Modeling and Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems in Electric Power Distribution Networks / H. Mehrjerdi, R. Hemmati, R // *Journal of Cleaner Production*. - doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.195.
  4. **The influence of electric vehicle charging strategies on the sizing of electrical energy storage systems in charging hub microgrids.** (2020). / Haupt, L., Schöpf, M., Wederhake, L., & Weibelzahl, M. // *Applied Energy*, 273, 115231. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115231.
  5. **Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system** (2019) / Wanzhong Zhao, Gang Wu, Chunyan Wang, Leiyan Yu, Yufang Li // *Journal of Power Sources*. Vol. № 427. – 2019. – pp. 174 – 183.
  6. **Energy Storage Systems: Russian and Foreign Experience** / V.M. Zyryanov, N.G. Kiryanova, I.Yu. Korotkov [et al.]- Text: Immediate // *Energy Policy*. – 2020. – No. 6(148). – pp. 76-87.
  7. **Ryabtsev, G.G.** Effectiveness indices of energy capacitor storage for underground cars / G.G. Ryabtsev, K.S. Zheltov // *Electrical Engineering*. – 2014. – No.8. – pp. 47-50.
  8. **Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives** / O. S. Valinsky, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. M. Evstaf'ev // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 91. – No 10. – P. 604-608. – DOI 10.3103/S1068371220100119.
  9. **Nezevak, V.L.** Version comparison of electric energy storage use in systems of traction power supply and in electro-rolling stock / V.L. Nezevak // *Transport: Science, Engineering, Control*. – 2020. – No.9. – pp. 17-23.
  10. **Buinosov, A.P.** Outlooks in use of electric energy storage in motor-car rolling stock / A.P. Buinosov, M.G. Durandin, O.I. Tutynin // *Bulletin of Urals State Technical University of Railway Communications*. – 2020. – No.4 (48). – pp. 35-45.
  11. **Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices** (2020) / M. V. Shevlyugin, A. E. Gollitsyna, M. N. Belov, D. S. Pletnev. // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 91. – No 9. – P. 552-556. – DOI 10.3103/S1068371220090114.
  12. **Nezevak, V.L.** Effectiveness assessment of energy storage system use to ensure own needs in DC traction substations / V.L. Nezevak, S.S. Samolinov, E.K. Khusainov // *Proceedings of the IV-th Inter. Scientif.-Pract. Conf. within Limits of Scientif.-Educational Forum*, Omsk, December 10, 2020. – Omsk: Omsk State University of Railway Communications, 2020. – pp. 49-56.
  13. **Nezevak, V.L.** Energy storage system use at traction substations to ensure own needs / V.L. Nezevak // *Proceedings of the IV-th All-Russian Scientif.-Pract. Conf., Chita, December 24, 2020*. – Chita: "Transbaikal Institute of Railway Transport – Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Vocational Training "Irkutsk Institute of Railway Communications", 2020. – pp. 173-178.
  14. **Nezevak, V.** (2020). Electric Energy Storage Units Applicability Assessment of Different Kinds in the Conditions of Moscow Central Ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 1115 AISC, Pp. 42 – 51, DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_5.
  15. **Nezevak, V.** (2020). Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system / V.

- Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 982, Pp. 524 – 538, DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_50.
16. **Cheremisin, V.T.** Outlooks of Electricity Storage System Use in Moscow Central Ring / V.T. Cheremisin, V.L. Nezevak // *Bulletin of Scientific Researches Results*. – 2020. – No.2. – pp. 33-44.
17. **Nezevak, V.L.** Electricity storage use in system of traction power supply to increase traffic capacity in limiting areas / V.L. Nezevak, S.S. Samolinov // *Urals Transport*. – 2020. – No.1 (64). pp. 104-109.
18. **Cheremisin, V.T.** Work efficiency increase of traction power supply system with hybrid electricity storage: monograph / V.T. Cheremisin, V.L. Nezevak, A.P. Shatokhin // Omsk. *Omsk State University of Railway Communications*, 2019. – pp. 222.
19. **Nezevak, V.L.** Characteristics of traction load for definition of electricity storage parameters / V.L. Nezevak, A.P. Shatokhin // *Transport World*. – 2018. – No.2. – pp. 84-94.
20. **Nezevak, V.L.** Threshold voltage impact of electricity storage system upon power indices of traction power supply / V.L. Nezevak // *Bulletin of Volga Region Transport*. – 2020. – No.4 (82). – pp. 28-37.
21. **Nezevak, V.L.** Imitation model traction power supply for definition of energy indices under conditions of electricity storage system work / V.L. Nezevak // *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. – 2020. – No.3 (67). – pp. 70-80. - DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80.

Ссылка для цитирования:

Незевак, В.Л. Оценка влияния системы накопления энергии на уровень напряжения на шинах активного поста секционирования постоянного тока / В. Л. Незевак // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2021. - № 8. – С. 46 - 60. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-8-46-60.

Статья поступила в редакцию 24.04.21.

Рецензент: д.т.н., доцент Брянского государственного технического университета

Пугачев А.А.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 26.07.21.

#### Сведения об авторе:

**Незевак Владислав Леонидович**, доцент кафедры «Электроснабжения железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения, e-mail: NezevakWL@mail.ru.

**Nezevak Vladislav Leonidovich**, Assistant Prof. of the Dep. “Power Supply of Railway Transport”, Omsk State University of Railway Communications, e-mail: NezevakWL@mail.ru.