



Повышение эффективности рекуперации путём применения систем накопления электроэнергии для собственных нужд тяговых подстанций



Владислав НЕЗЕВАК

Владислав Леонидович Незевак

*Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.
✉ NezevakWL@mail.ru.*

АННОТАЦИЯ

Применение рекуперативного торможения электроподвижным составом на железных дорогах постоянного тока позволяет повысить энергетическую эффективность перевозочного процесса. Эффективное применение рекуперативного торможения связано с созданием условий приёма получаемой в результате энергии. В этих целях в системе тягового электроснабжения в настоящее время применяются выпрямительно-инверторные преобразователи и поглощающие устройства.

Перспективной технологией, обеспечивающей повышение эффективности применения рекуперативного торможения, является хранение энергии, позволяющее использовать эту энергию в дальнейшем для покрытия графика тяговой нагрузки. Особенностью применения рекуперативного торможения на однопутных участках железных дорог постоянного тока с малой интенсивностью движения является необходимость применения преобразователей или поглощающих устройств. Одним из вариантов повышения эффективности использования энергии рекуперации является использование систем накопления электроэнергии для потребителей собственных нужд тяговых подстанций. Применение указанного технического решения целесообразно на однопутных участках с интенсивным применением рекуперативного торможения, эффективность которого связана со снижением электропотребления потребителями собственных нужд из внешней сети.

Выполненные зарубежные исследования позволяют обозначить тенденцию распространения технологии хранения электроэнергии в различных областях – от возобновляемых источников до электроэнергетических систем, в том числе систем электроснабжения транспорта. Международный опыт показывает успешность реализации пилотных проектов по внедрению систем накопления электроэнергии при решении задач повышения эффективности электрического городского и пригородного транспорта, а также метрополитена.

Целью работы является оценка энергетических показателей работы систем накопления электроэнергии при использовании энергии рекуперации для потребителей собственных нужд тяговой подстанции. В исследовании использованы методы математического и имитационного моделирования, оптимизации и математической статистики.

Рассмотрены вопросы применения систем накопления электроэнергии для обеспечения электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций постоянного тока. На примере одной из подстанций рассмотрены основные вопросы функционирования систем накопления. Показаны особенности графика нагрузки рекуперации, которые обуславливают применение гибридных технологий для построения системы накопления. На примере рассматриваемой тяговой подстанции приведено решение задачи определения основных параметров системы накопления с учётом специфики работы электрохимических и электрических модулей.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, рекуперативное торможение, постоянный ток, тяговая подстанция, собственные нужды, система накопления, мощность, энергоёмкость, гибридное устройство.

Для цитирования: Незевак В. Л. Повышение эффективности рекуперации путём применения систем накопления электроэнергии для собственных нужд тяговых подстанций // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 3 (94). С. 82–95. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-3-9>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие технологий хранения электроэнергии, преобразования и снижение удельной стоимости систем накопления в целом обуславливают рассмотрение вопросов их применения для повышения энергетической эффективности перевозок в транспортных системах.

Как показывают зарубежные исследования, в настоящее время вопросы применения систем накопления электроэнергии на основе накопителей различных видов являются актуальными, а данные технологии находят применение в сфере электроэнергетики для возобновляемых источников [1; 2], систем электроснабжения населённых пунктов [3; 4], транспортных средств [5; 6], транспортных систем [7; 8] и др.

Развитие технологий, улучшение удельных характеристик и снижение стоимости накопителей электроэнергии различных видов обуславливают перспективы применения систем накопления на подвижном составе и в системах электроснабжения железнодорожного транспорта при решении широкого круга задач [9–11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель исследования – определить влияние энергоёмкости систем накопления электроэнергии на эффективность использования энергии рекуперации и мощности при их размещении на тяговых подстанциях для питания собственных нужд, определить характер изменения степени использования энергии рекуперации в целом и модулями гибридной системы накопления в зависимости от их энергоёмкости, оценить уровень параметров системы накопления гибридной технологии для собственных нужд на примере тяговой подстанции с заданной нагрузкой собственных нужд и мощностью рекуперации. Оценка энергетических показателей системы накопления выполняется с использованием *методов* математического и имитационного моделирования. Для оценки параметров гибридной системы накопления используются *методы* оптимизации и математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика нагрузки подстанции

Системы накопления электроэнергии на электрических подстанциях и станциях при-

меняются как резервный источник электроэнергии, позволяющий повысить надёжность электроснабжения в случае исчезновения напряжения с шин переменного тока собственных нужд до 1000 В. Особенностью тяговых подстанций железнодорожного транспорта является появление на шинах постоянного тока избыточной энергии рекуперации, передаваемой на секции контактной сети смежных межподстанционных зон или в сеть переменного тока подстанции. Указанная энергия рекуперации в зависимости от текущего уровня нагрузки распределяется по присоединениям переменного тока тяговых подстанций и частично возвращается в систему внешнего электроснабжения [12]. Одним из вариантов, направленных на повышение эффективности использования энергии рекуперации, является применение систем накопления, позволяющее сглаживать график тяговой нагрузки или снижать электропотребление на тяговые нужды за счёт использования энергии рекуперации.

Приём избыточной энергии рекуперации на тяговых подстанциях осуществляется с помощью применения выпрямительно-инверторных (инверторных) преобразователей или поглощающих устройств (на основе реостатных модулей).

График тяговой нагрузки по вводу выпрямительно-инверторных преобразователей позволяет оценить уровень тяговой нагрузки и рекуперации и определить статистические показатели. В качестве примера ниже приведены графики нагрузки для одной из тяговых подстанций на однопутном участке железной дороги с интенсивным применением рекуперативного торможения. Фрагмент схемы главных электрических соединений подстанции с выпрямительно-инверторным преобразователем, рассматриваемый при решении задачи, представлен на рис. 1.

На основе данных программного комплекса «Энергия Альфа 2» построены графики нагрузки и возврата энергии рекуперации с одноминутным интервалом для тяговой подстанции. Для рассматриваемого случая максимальная мощность потребления тяговой нагрузки не превышает 12,5 МВт, рекуперации – 1,8 МВт (рис. 2). В более чем 80 % случаев измерений тяговая нагрузка по вводу выпрямительного преобразователя в течение суток не превышает 1500 кВт, а для случаев рекуперации – 1050 кВт.



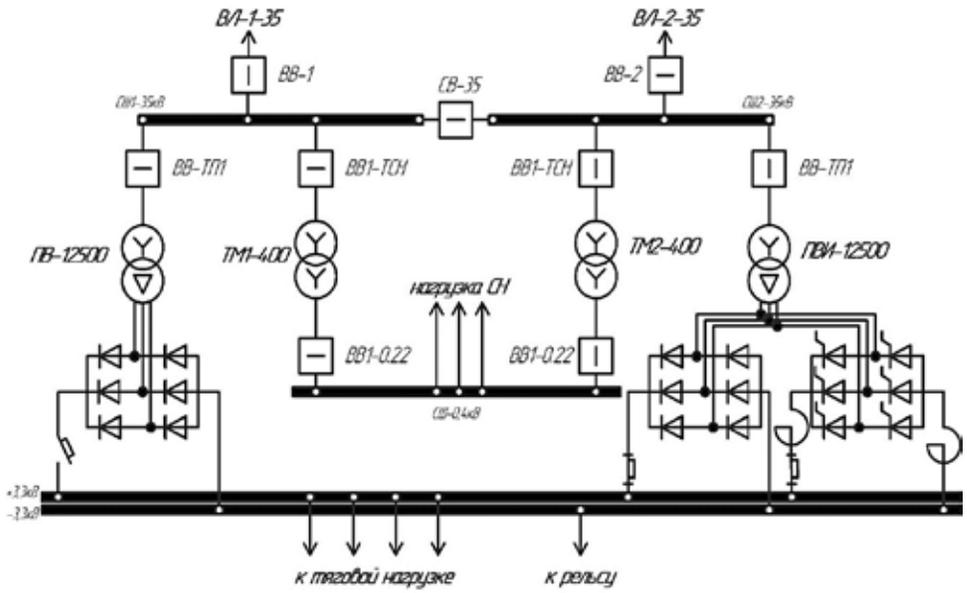


Рис. 1. Фрагмент типовой схемы тяговой подстанции постоянного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем [13].

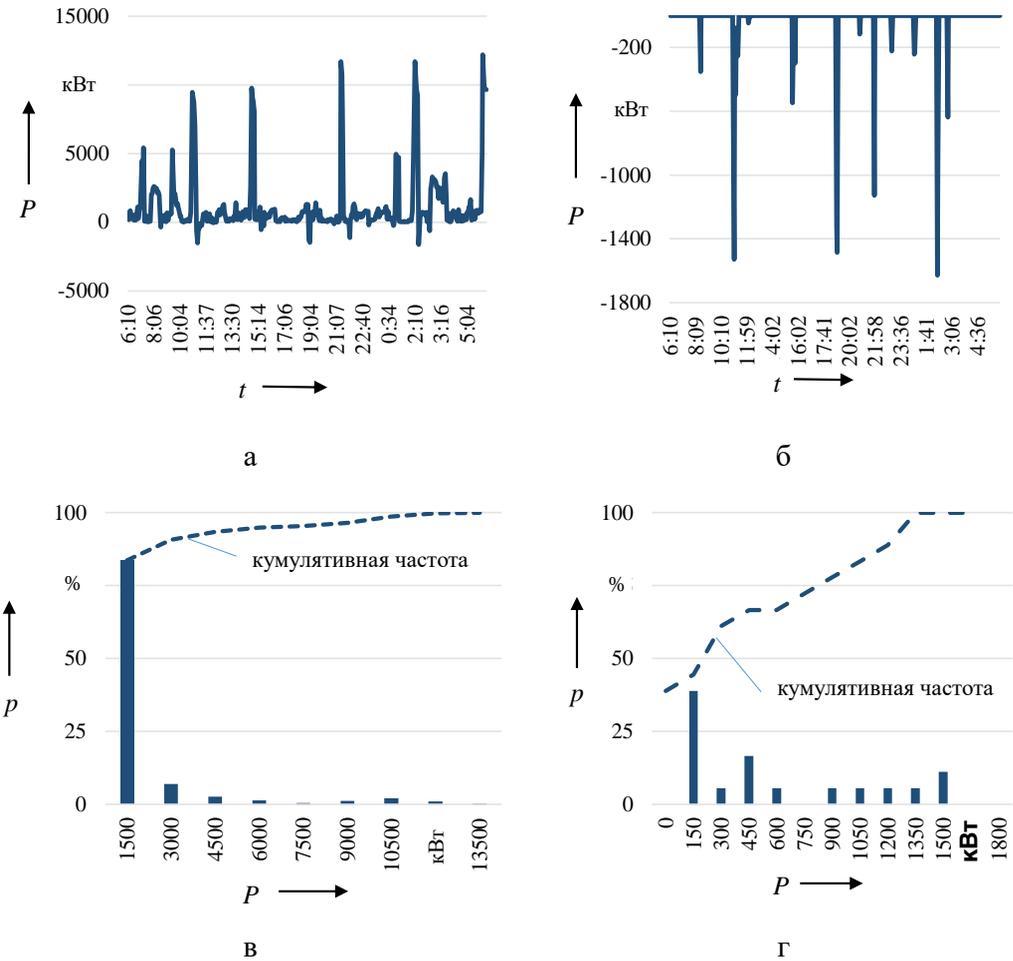


Рис. 2. Мощность тяговой нагрузки на шинах подстанции (а), рекуперации (б), распределение мощности тяговой нагрузки (в) и рекуперации (г) (выполнено автором).

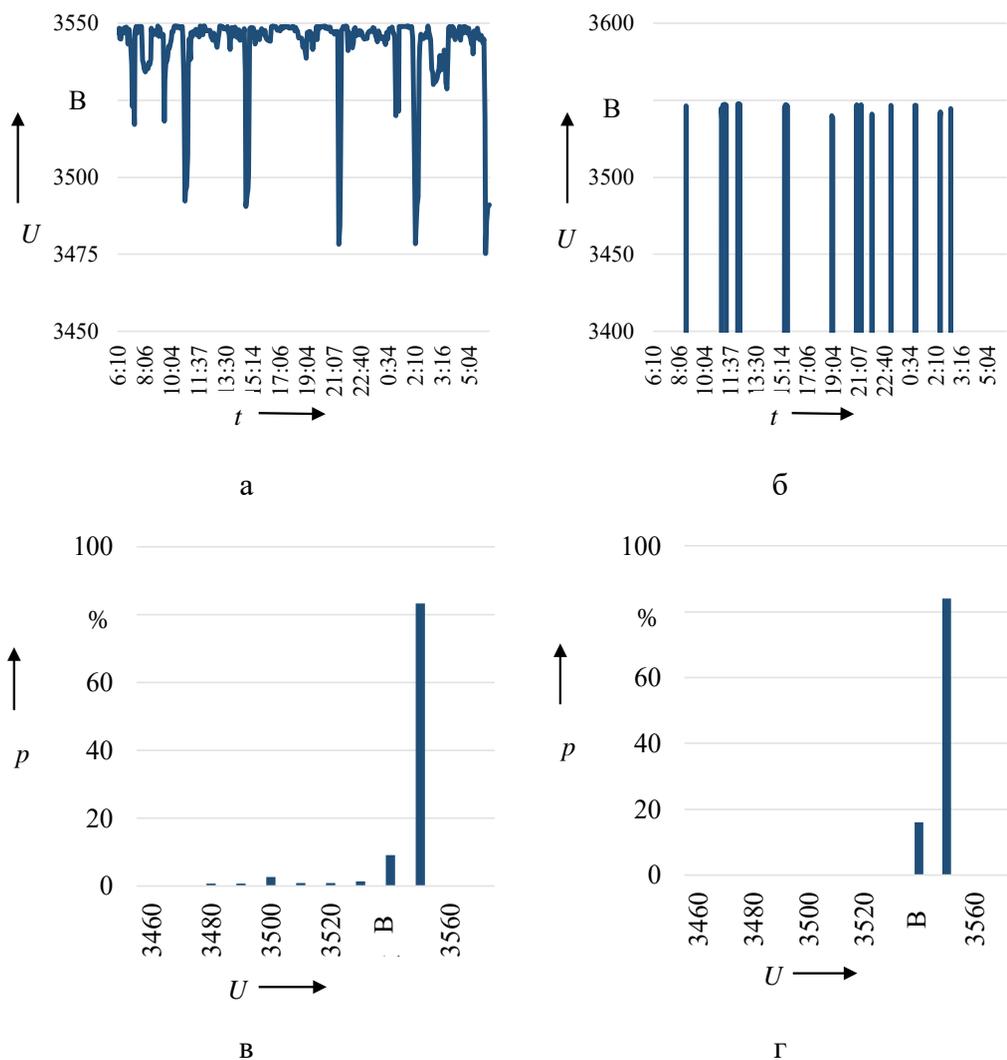


Рис. 3. Напряжения на шинах в режиме тяги (а), рекуперации (б) и распределения напряжения в режиме тяги (в) и рекуперации (г) (выполнено автором).

Расчётные или статистические данные измерений позволяют оценить для сложившегося уровня тяговой нагрузки максимальные значения мощности рекуперации $P_{\text{макс рек}}$ на шинах подстанции и определить мощность заряда системы накопления $P_{\text{СНЭ}}$ с учётом перспективы увеличения нагрузки $k_{\text{перс}}$:

$$P_{\text{з СНЭ}} \geq k_{\text{перс}} P_{\text{макс рек}} \quad (1)$$

Выбор настроек режимов работы системы накопления электроэнергии выполняется на основе уровня тяговой нагрузки и напряжения на шинах [14; 15]. Уровень напряжения на шинах подстанции в режиме тяги и возврата энергии рекуперации существенно не от-

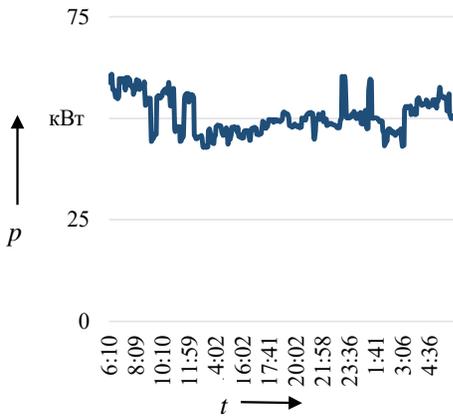
личается, более 80 % измерений фиксируют напряжение в диапазоне от 3500 до 3550 В для обоих режимов (рис. 3).

При настройке режимов работы условиями включения системы накопления на заряд будут являться отсутствие тока нагрузки на вводу 3,3 кВ и уровень напряжения, превышающий уровень напряжения холостого хода с учётом изменения напряжения на шинах высшего напряжения:

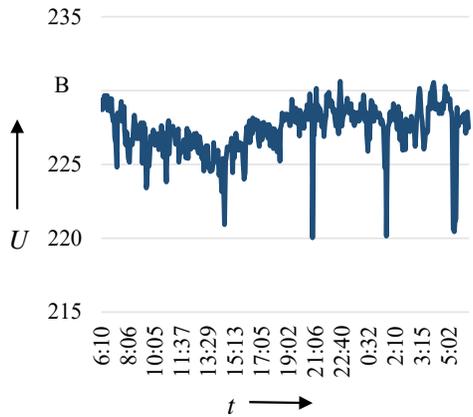
$$\begin{aligned} I_{\text{вв.3,3}} &\approx 0; \\ U_{\text{ш.3,3}} &\geq U_{\text{хх}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Условия работы в режиме разряда системы накопления опираются на уровень нагрузки собственных нужд и требуемый режим поддержания напряжения (графики мощности и

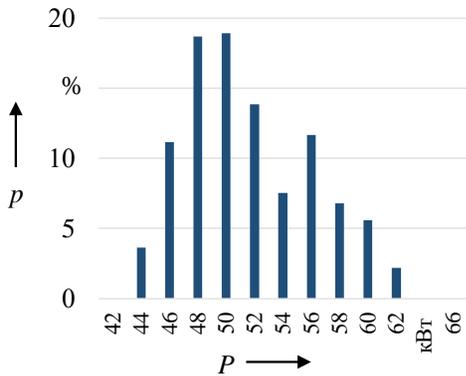




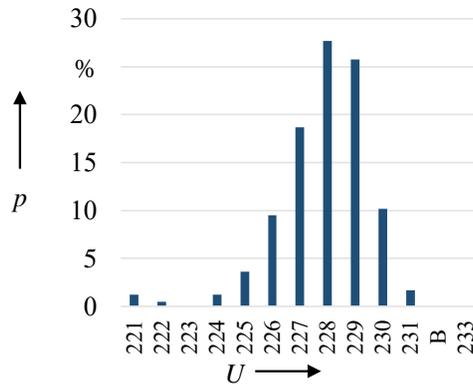
а



б

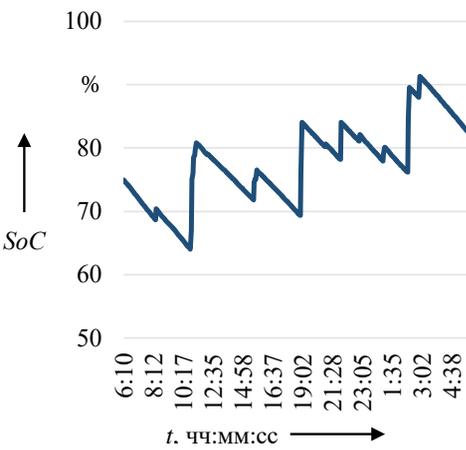


в

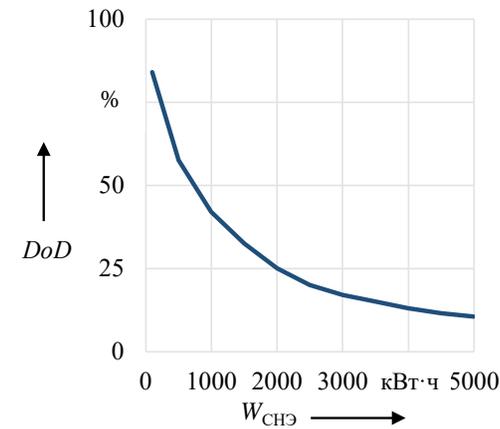


г

Рис. 4. Мощность (а) и напряжение (б) системы собственных нужд, распределение мощности (в) и напряжения на шинах 0,4 кВ (г) (выполнено автором).



а



б

Рис. 5. Степень заряженности (а) и глубины разряда (б) системы накопления (выполнено автором).

Характеристика эпизодов заряда для рассматриваемой подстанции
(составлено автором)

$N_{\text{эпизода}}$	$I_{\text{макс}}, \text{ A}$	$I_{\text{мин}}, \text{ A}$	$U_{\text{макс}}, \text{ В}$	$U_{\text{мин}}, \text{ В}$	$t, \text{ мин}$
1	98,7	98,7	3546,5	3546,5	3,4
2	22,1	431,8	3547,3	3538,3	23,8
3	4,2	12,8	3547,7	3547,6	6,8
4	1,4	1,4	3547,6	3547,6	3,4
5	34,9	153,9	3547,2	3545,3	6,8
6	84,5	84,5	3546,6	3546,6	3,4
7	372,5	419,6	3539,9	3538,7	6,8
8	32,7	32,7	3547,2	3547,2	3,4
9	0,4	0,4	3547,3	3547,3	3,4
10	318,3	318,3	3541,1	3541,1	3,4
11	62,9	62,9	3546,6	3546,6	3,4
12	61,5	67,9	3546,8	3546,8	6,8
13	257,1	459,8	3542,6	3537,7	6,8
14	179,8	179,8	3544,6	3544,6	3,4
Среднее	109,4	166,0	3545,6	3544,4	6,1

напряжения приведены на рис. 4). Уровень существующей нагрузки оценивается по данным измерений и уточняется с учётом перспективы развития.

Мощность системы накопления в режиме разряда будет определяться, исходя из полного покрытия мощности собственных нужд с учётом запаса (k_3):

$$\begin{aligned} P_{\text{рСНЭ}} &\geq k_3 P_{\text{максСН}}; \\ U_{\text{минСН}} &\leq U_{\text{шСН}} \leq U_{\text{максСН}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Условия заряда и разряда системы накопления на подстанции

На основе графиков нагрузки на шинах 3,3 кВ и собственных нужд оценивается степень заряженности системы накопления и зависимость глубины разряда от номинальной энергоёмкости. Для рассматриваемой тяговой подстанции графики степени заряженности и зависимости глубины разряда от номинальной энергоёмкости приведены на рис. 5. Оценка работы системы накопления для существующих и расчётных условий позволяет оценить характер изменения степени заряженности и требуемую энергоёмкость. Особенностью работы систем накопления для собственных нужд тяговых подстанций является многократное превышение мощности заряда над мощностью разряда и необходимость существен-

ного увеличения энергоёмкости для ограничения глубины разряда. В рассматриваемом случае в графике степени заряженности преобладает заряд, а ограничение глубины разряда до 30 % определяет энергоёмкость на уровне 2000 кВт•ч (7200 МДж). Оценка энергоёмкости системы накопления для тяговых подстанций, приведённая в [16], нуждается в корректировке в связи с относительно низким значением, указанным на уровне 200 МДж.

Помимо указанных особенностей, необходимо отметить кратковременность эпизодов заряда. Продолжительность эпизодов заряда находится в диапазоне от 1 до 24 мин, а суммарное количество эпизодов для рассматриваемого случая составляет – 14 в сутки (табл. 1). Аналогичные значения получены при исследовании тяговой нагрузки для различных объектов системы тягового электроснабжения [17–19].

Рассмотренные особенности работы систем накопления необходимо учитывать при выборе вида накопителя или использовании гибридной технологии. В настоящее время промышленностью выпускаются сетевые системы накопления на основе литий-ионных аккумуляторов различных модификаций. Изготовление в контейнерном или шкафом исполнении позволяет изменять в широком



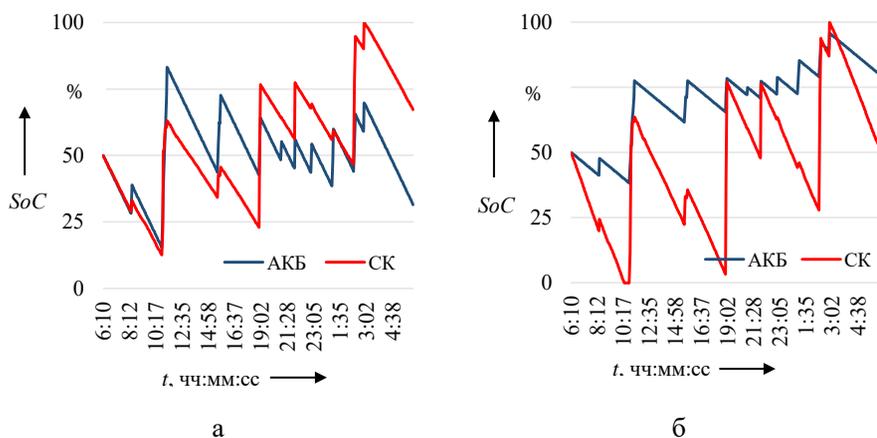


Рис. 6. Степень заряженности накопительных модулей системы накопления для первого (а) и второго (б) вариантов (выполнено автором).

диапазоне их мощности от 100 до 1000 кВт·А с возможностью увеличения путём параллельного подключения нескольких систем для получения общей мощности до 20 МВт·А и выше. Время быстрой зарядки у литий-ионных аккумуляторов составляет около 0,5 часа, что значительно меньше средней продолжительности эпизода заряда для тяговой подстанции. В то же время другие виды накопителей, например, суперконденсаторы, осуществляют зарядку за время до 10 минут.

Количество элементов в накопительных модулях вне зависимости от вида определяется требуемым уровнем напряжения системы накопления и нагрузки путём расчёта последовательно и параллельно соединённых элементов:

$$m = \frac{U_1}{U_{2\text{ном}}}; \quad (4)$$

$$n = \frac{I_1}{I_{2\text{ном}}}.$$

По условиям ограничения глубины разряда применение литий-ионных аккумуляторов в системе накопления требует большей энергоёмкости, по сравнению с другими видами накопителей электроэнергии, не чувствительными к глубине разряда, например, суперконденсаторами. В этой связи для снижения суммарной энергоёмкости системы накопления рассматриваются варианты использования гибридной технологии. В зависимости от сочетания энергоёмкости накопительных элементов в системе изменяется их степень заряженности и глубина разряда. В качестве примера для рассматриваемой подстанции приведены графики степени заряженности

для двух сочетаний энергоёмкости аккумуляторной батареи (АКБ) и суперконденсатора (СК) с равной суммарной энергоёмкостью для следующих значений (рис. 6):

1) 100/1700 (заряд) и 10/1700 (разряд) кВт и 100/500 кВт·ч соответственно с глубиной разряда 68 и 88 % для АКБ и СК соответственно (рис. 6а);

2) 150/1700 (заряд) и 10/1700 (разряд) кВт и 250/350 кВт·ч соответственно с глубиной разряда 58 и 100 % для АКБ и СК соответственно (рис. 6б).

Приведённые примеры показывают возможность изменения условий работы накопительных модулей при сохранении суммарной энергоёмкости системы.

Схемная реализация

В зависимости от подключения системы накопления к шинам постоянного тока подстанции можно выделить два варианта схемной реализации. Первый вариант – передача мощности к системе осуществляется через преобразователь постоянно-постоянного напряжения (П1), далее к шинам переменного тока собственных нужд через преобразователь постоянно-переменного напряжения П2 (рис. 7).

Во втором варианте передача мощности осуществляется трёхфазным током с помощью преобразователя П1, а питание шин постоянного тока подстанции – от накопителя через преобразователь П2.

В обоих вариантах преобразователи П1 выполняются на максимальную мощность заряда. Преобразователь П2 для первого вари-

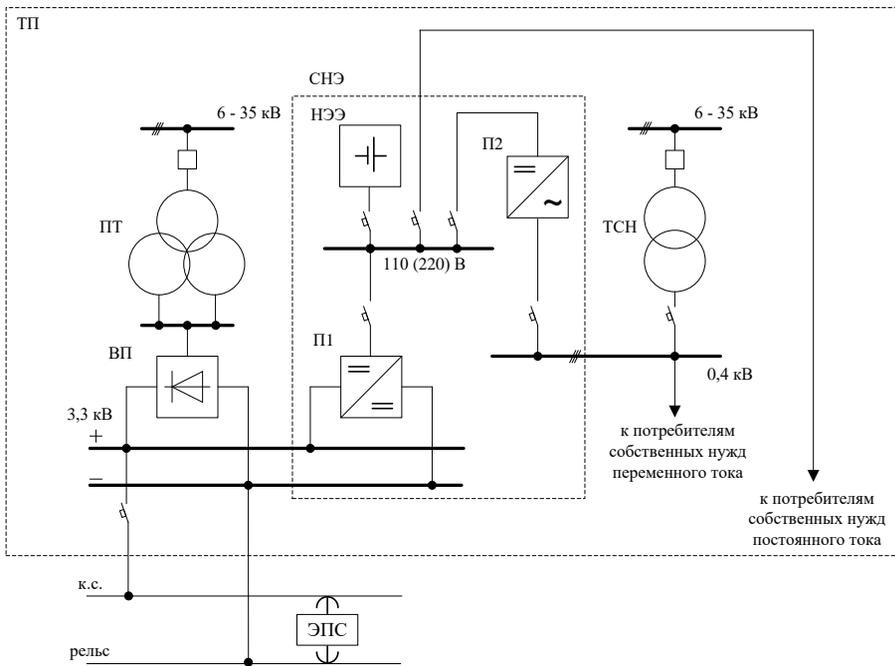


Рис. 7. Схема подключения системы накопления (первый вариант) (выполнено автором).

анта выполняется на максимальную мощность потребителей собственных нужд, для второго варианта мощность преобразователя П2 и П1 равны (рис. 8). Мощность преобразователя П2 для второго варианта выше на величину нагрузки шин постоянного тока подстанции. Преимуществом схемы исполнения системы по второму варианту является использование напряжения 0,4 кВ, что позволяет снизить уровень номинального тока в главных цепях и сократить потери в них, недостатком – необходимость применения второго преобразователя П2 с мощностью, равной мощности П1. Для обеспечения гальванической развязки цепей для питания собственных нужд схема преобразователей включает в себя раздельный трансформатор.

Модель определения параметров системы накопления

Различные варианты распределения энергоёмкости накопителей гибридной системы отличаются между собой энергетическими показателями их работы и стоимостью, являющейся интегральным показателем. В общем случае при оценке инвестиционных проектов эффект будет определяться, с одной стороны, притоками на основе экономии электроэнергии, потребляемой на собственные нужды, с другой стороны, расходами на техническое обслу-

живание, сооружения, строительномонтажные работы, замену накопительных элементов и др. Если принять допущение о том, что указанные затраты равны для всех вариантов, то при выборе энергоёмкости накопительных модулей гибридной системы целевая функция задачи будет учитывать значения параметров и их удельную стоимость (мощности и энергоёмкости). В этом случае решение задачи по определению мощности и энергоёмкости позволяет определить оптимальные значения указанных величин на основе следующей математической модели:

$$\begin{cases}
 C = aP_{\text{ном зар}}^{\text{АКБ}} + bW_{\text{ном зар}}^{\text{АКБ}} + cP_{\text{ном раз}}^{\text{СК}} + dW_{\text{ном раз}}^{\text{СК}} \rightarrow \min; \\
 P_{\text{ном зар}}^{\text{АКБ}} + P_{\text{ном зар}}^{\text{СК}} \geq \max(P_{\text{рек}} - P_{\text{СК}}^{\text{СК}}); \\
 P_{\text{ном раз}}^{\text{АКБ}} + P_{\text{ном раз}}^{\text{СК}} \geq \max(P_{\text{СК}}^{\text{СК}} - P_{\text{рек}}); \\
 P_{\text{ном}}^{\text{АКБ(СК)}} = \max(k_{\text{зар}}^{\text{АКБ(СК)}} P_{\text{ном зар}}^{\text{АКБ(СК)}}, k_{\text{раз}}^{\text{АКБ(СК)}} P_{\text{ном раз}}^{\text{АКБ(СК)}}); \\
 \forall t_i \in [0; T]: 0 \leq \sum_0^{t_i} W_{t_i}^{\text{АКБ(СК)}} \leq W_{\text{ном}}^{\text{АКБ(СК)}}; \\
 P_{\text{ном зар(раз)}}^{\text{АКБ}} \leq k_{\text{зар(раз)}}^{\text{АКБ}} \frac{W_{\text{ном}}^{\text{АКБ}}}{t}; P_{\text{ном}}^{\text{СК}} \geq P_{\text{рек}}^{\text{СК}}; \\
 d_{\text{зар}}^{\text{АКБ}} + d_{\text{зар}}^{\text{СК}} \geq d_{\text{зар мин}}; \\
 d_{\text{раз}}^{\text{АКБ}} + d_{\text{раз}}^{\text{СК}} \geq d_{\text{раз мин}}; \\
 d_{\text{исп}}^{\text{СК}} \geq d_{\text{исп мин}}^{\text{СК}}; \\
 d_{\text{исп}}^{\text{рек}} \geq d_{\text{исп мин}}^{\text{рек}}; \\
 DoD_{\text{мин}}^{\text{АКБ(СК)}} \leq DoD_{\text{макс}}^{\text{АКБ(СК)}} \leq DoD_{\text{макс}}^{\text{АКБ(СК)}}; \\
 SoC_{\text{нач}}^{\text{АКБ(СК)}} - SoC_{\text{кон}}^{\text{АКБ(СК)}} \geq 0;
 \end{cases} \quad (5)$$

где C – целевая функция;



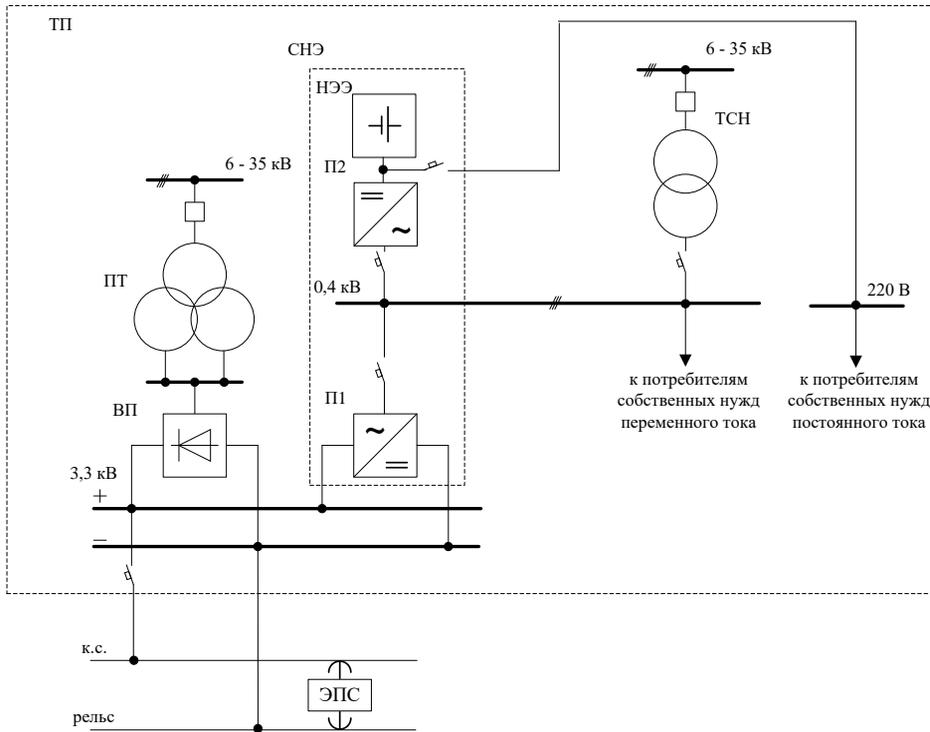


Рис. 8. Схема подключения системы накопления (второй вариант) (выполнено автором).

a, b, c, d – удельная стоимость мощности и энергоёмкости аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$P_{ном}^{АКБ}, W_{ном}^{АКБ}, P_{ном}^{СК}, W_{ном}^{СК}$ – номинальные мощ-

ности и номинальные энергоёмкости аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$P_{ном\ зар}^{АКБ}, P_{ном\ зар}^{СК}$ – номинальные мощности

заряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$P^{рек}, P^{СН}$ – мощности рекуперации и соб-

ственных нужд соответственно;

$P_{ном\ разр}^{АКБ}, P_{ном\ разр}^{СК}$ – номинальные мощности

разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$k_{зар}^{АКБ(СК)}, k_{разр}^{АКБ(СК)}$ – коэффициенты увеличе-

ния номинальной мощности заряда и разряда для аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$W_{t_i}^{АКБ(СК)}, W_{ном}^{АКБ(СК)}$ – объём энергии на интер-

вале эпизода t_i и номинальная энергоёмкость аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

t – расчётная продолжительность режимов заряда и разряда;

$d_{исп}^{СН}$ – коэффициент использования электро-
энергии собственных нужд при разряде:

$$d_{исп}^{СН} = \frac{W_{разр}}{W^{СН}}; \quad (6)$$

$d_{исп}^{рек}$ – коэффициент использования энергии
рекуперации при заряде:

$$d_{исп}^{рек} = \frac{W_{зар}}{W^{рек}}; \quad (7)$$

$d_{зар(разр)}^{АКБ(СК)}$ – коэффициент использования энер-
гии в режимах заряда и разряда для аккумуля-
торной батареи и суперконденсатора соответ-
ственно:

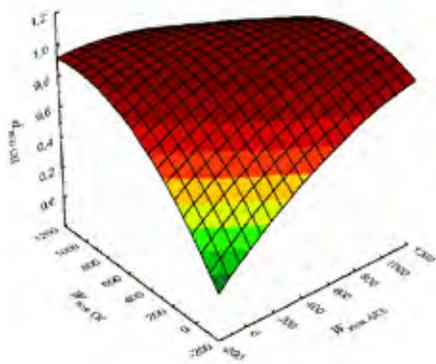
$$d_{зар(разр)}^{АКБ(СК)} = \frac{W_{зар(разр)}^{АКБ(СК)}}{W_{зар(разр)}}; \quad (8)$$

$W_{разр}, W_{зар}$ – объёмы энергии системы накоп-
ления в режиме разряда и заряда соответственно;
 $W^{СН}, W^{рек}$ – объём электроэнергии соб-

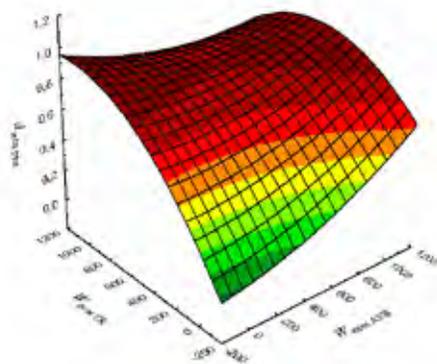
ственных нужд и рекуперации за расчётный
период;

$W_{зар(разр)}^{АКБ(СК)}$ – объём электроэнергии в режиме
заряда и разряда для аккумуляторной батареи и
суперконденсатора соответственно.

Решение задачи выполняется в два этапа.
На первом этапе в качестве исходных данных

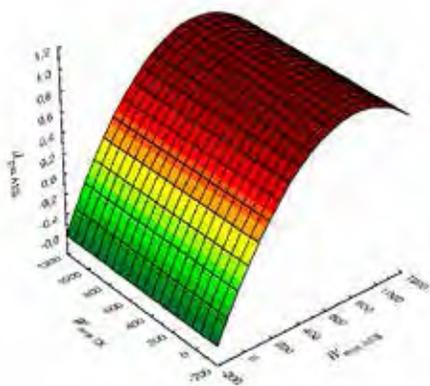


а

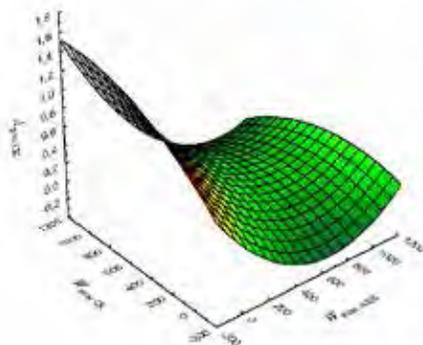


б

Рис. 9. Коэффициенты использования энергии собственных нужд (а) и энергии рекуперации (б) (выполнено автором).



а



б

Рис. 10. Коэффициенты использования энергии разряда аккумуляторной батареи (а) и суперконденсатора (б) (выполнено автором).

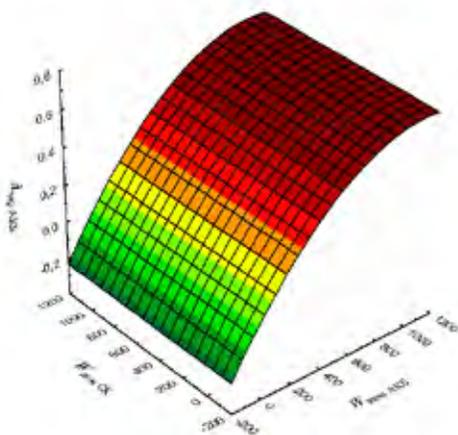
принимается график нагрузки собственных нужд подстанции и мощности избыточной рекуперации на шинах подстанции. Для заданных профилей нагрузки выполняется имитационное моделирование для различной энергоёмкости и мощности накопителей системы, определяются коэффициенты использования энергии в режимах заряда и разряда.

На данном этапе определяются ограничения по максимальной мощности заряда и разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора, особенности работы, к которым следует отнести приоритет заряда для аккумуляторной батареи и ограничение мощности её разряда. Для суперконденсатора задаются

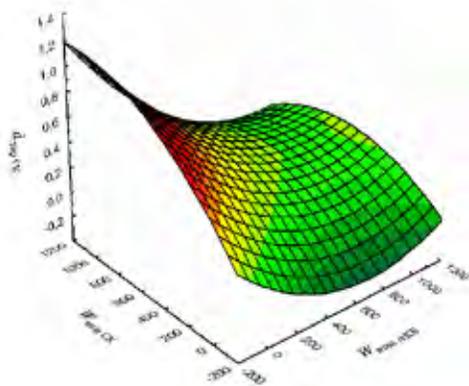
условия, при которых максимальная мощность данного модуля используется как дополнительная для обеспечения приема мощности рекуперации.

Имитационное моделирование работы системы накопления для различных вариантов сочетания энергоёмкостей позволяет получить функции, описывающие изменение коэффициентов использования энергии в режимах заряда и разряда для модулей аккумуляторной батареи и суперконденсатора при различной комбинации энергоёмкости и мощности. Полученные значения используются для аппроксимации полученных значений для каждого коэффициента.





а



б

Рис. 11. Коэффициенты использования энергии заряда аккумуляторной батареи (а) и суперконденсатора (б) (выполнено автором).

На втором этапе решается задача отыскания оптимальных параметров системы накопления. Указанная задача относится к задачам условной нелинейной оптимизации, решение которой выполняется прямыми и косвенными методами. Для решения рассматриваемой задачи применяются методы спуска и штрафных функций. В методах спуска выбор направления спуска учитывает ограничения задачи в явном виде, в методах штрафных функций задачу сводят к последовательности задач безусловной оптимизации за счёт добавления к целевой функции вспомогательных функций и переходе к учёту ограничений в неявном виде.

Результаты моделирования

Результаты имитационного моделирования для заданного графика нагрузки рассматриваемой подстанции позволяют определить изменение расчётных коэффициентов в зависимости от энергоёмкости модулей системы накопления. Для заданного графика нагрузки потребителей собственных нужд и рекуперации доли использования мощности и энергии определяются параметрами накопительных модулей.

График нагрузки собственных нужд и возврата энергии рекуперации на шины рассматриваемой подстанции позволяет определить характер изменения коэффициентов использования энергии модулей в режимах заряда и разряда. Графики изменения коэффициентов использования, полученные в программе Statistica, приведены на рис. 9.

Полученные результаты для коэффициентов использования нагрузки собственных нужд и энергии рекуперации могут быть представлены в аналитическом виде:

$$d_{\text{исп}}^{\text{СК}} = 0,5007 + 0,0007 \cdot x + 0,001 \cdot y - 2,6219 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 5,9361 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,1047 \cdot 10^{-7} \cdot y^2; \quad (9)$$

$$d_{\text{исп}}^{\text{рек}} = 0,3439 + 0,0001 \cdot x + 0,0011 \cdot y + 1,9312 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 4,2204 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,4906 \cdot 10^{-7} \cdot y^2. \quad (10)$$

где x – номинальная энергоёмкость аккумуляторной батареи $W_{\text{ном}}^{\text{АКБ}}$;

y – номинальная энергоёмкость суперконденсатора $W_{\text{ном}}^{\text{СК}}$.

Изменение коэффициентов использования энергии разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора приведены на рис. 10 и могут быть представлены в аналитическом виде:

$$d_{\text{разр}}^{\text{АКБ}} = -0,0323 + 0,0025 \cdot x - 1,4095 \cdot 10^{-17} \cdot y - 1,5934 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 5,6831 \cdot 10^{-21} \cdot x \cdot y + 8,0468 \cdot 10^{-21} \cdot y^2; \quad (11)$$

$$d_{\text{разр}}^{\text{СК}} = 0,5329 - 0,0019 \cdot x + 0,001 \cdot y + 1,3312 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 5,9361 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,1047 \cdot 10^{-7} \cdot y^2. \quad (12)$$

Графики коэффициентов использования энергии заряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора приведены на рис. 11 и могут быть представлены в следующем аналитическом виде:

$$d_{\text{зар}}^{\text{АКБ}} = 0,0225 + 0,0012 \cdot x - 3,2526 \cdot 10^{-18} \cdot y - 5,1582 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 9,7887 \cdot 10^{-21} \cdot x \cdot y - 2,1176 \cdot 10^{-21} \cdot y^2; \quad (13)$$

$$d_{\text{зар}}^{\text{СК}} = 0,3214 - 0,0011 \cdot x + 0,0011 \cdot y + 7,0893 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 4,2204 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,4906 \cdot 10^{-7} \cdot y^2. \quad (14)$$

Глубина разряда по результатам расчётов в аналитическом виде описывается следующим образом:

$$DoD^{AKB} = 29,6301 + 0,1349 \cdot x - 2,4425E-15 \cdot y - 0,0001 \cdot x^2 + 9,385E-19 \cdot x \cdot y + 1,7483E-18 \cdot y^2; \quad (15)$$

$$DoD^{CK} = 59,2418 - 0,0526 \cdot x + 0,1388 \cdot y + 1,14E-7 \cdot x^2 + 1,8425E-5 \cdot x \cdot y - 0,0002 \cdot y^2. \quad (16)$$

Для решения оптимизационной задачи в среде Matlab математическая модель принимает следующий вид представления (17).

В качестве примера ниже представлены результаты решения задачи, полученные для следующих исходных данных:

$$a = 30 \text{ о. е./кВт}; b = 40 \text{ о. е./кВт}\cdot\text{ч};$$

$$C = 60 \text{ о. е./кВт}; d = 80 \text{ о. е./кВт}\cdot\text{ч};$$

$$P_{\text{рек}} = 1700 \text{ кВт}; P_{\text{CH}} = 60 \text{ кВт}, P_{\text{СК}} = 1700 \text{ кВт};$$

$$DoD_{\text{мин}}^{AKB(CK)} = 0\%; DoD_{\text{макс}}^{AKB} = 30\%. DoD_{\text{макс}}^{CK} = 100\%.$$

Представление задачи в среде Matlab (18)

Значение целевой функции для заданных условий составило 170,7 тыс. относительных единиц (о. е.) стоимости при следующих параметрах системы накопления: мощность и энергоёмкость аккумуляторной батареи – 269,3 кВт и 1346 кВт·ч, суперконденсатора – 1430,1 кВт и 286,1 кВт·ч.

Предложенная математическая модель позволяет получить основные параметры гибридной системы накопления с минимальной стоимостью на основе исходных данных о нагрузке и рекуперации на тяговой подстанции, заданных ограничениях и принятых допущениях. В качестве целевой функции в модели может быть принята стоимость жизненного цикла с учётом изменения срока службы накопительных

$$\left. \begin{aligned} f &= ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 \rightarrow \min : \text{целевая функция}; \\ -x_1 - x_3 + 1700 &\leq 0 : \text{ограничение по мощности}; \\ -x_1 &\leq 0 : \text{положительные значения} \\ -x_2 &\leq 0 \\ -x_3 &\leq 0 \\ -x_4 &\leq 0 \\ x_1 &\leq 2000 : \text{ограничение области положительных значений}; \\ x_2 &\leq 10000 \\ x_3 &\leq 2000 \\ x_4 &\leq 10000 \\ -0,2x_2 + x_1 &\leq 0 : \text{соотношение мощности и энергоёмкости АКБ}; \\ -5x_4 + x_3 &\leq 0 : \text{соотношение мощности и энергоёмкости СК}; \\ x_2 + x_4 - 10000 &\leq 0 : \text{суммарная энергоёмкость}; \\ -x_2 - x_4 + 500 &\leq 0 : \text{минимальная энергоёмкость}; \\ 0,3994 - 0,0006 \cdot x_2 - 0,001 \cdot x_4 + 2,1E-7 \cdot x_2^2 + \\ + 5,9E-07 \cdot x_2 \cdot x_4 + 5,1E-07 \cdot x_4^2 &\leq 0 : \text{доля использования} \\ \text{энергии нагрузки собственных нужд}; \\ 0,5561 - 1,0e-4 \cdot x_2 - 0,0011 \cdot x_4 - 1,9E-7 \cdot x_2^2 + \\ + 0,00422E \cdot x_2 \cdot x_4 + 5,5E-7 \cdot x_4^2 &\leq 0 : \text{доля использования} \\ \text{энергии рекуперации}; \\ 29,6301 + 0,1349 \cdot x_2 - 2,4425E-15 \cdot x_4 - 0,0001 \cdot x_2^2 + \\ + 9,385E-19 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,7483E-18 \cdot x_4^2 &: \text{глубина разряда АКБ}; \\ 59,2418 - 0,0526 \cdot x_2 + 0,1388 \cdot x_4 + 1,14E-7 \cdot x_2^2 + \\ + 1,8425E-5 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,0002 \cdot x_4^2 &: \text{глубина разряда СК}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$



```

>> A=[-1,0,-1,0;0,0,1,-5;0,1,0,1;0,-1,0,-1];
b=[-1700;0;10000;-500];
Aeq=[1,-0.2,0,0];
beq=0;
lb = [0,0,0,0];
ub = [2000,10000,2000,10000];
a1=30;b2=40;c3=60;d4=80;
x0=[100;1000;100;1000];
fun= @(x)a1*x(1)+b2*x(2)+c3*x(3)+d4*x(4);
nonlcon = @unitdisk;
x=fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq);
[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian]
fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)

```

(18)

Результаты решения задачи:

```

x(1) = 0.2693·103
x(2) = 1.3463·103
x(3) = 1.4307·103
x(4) = 0.2861·103
fval = 1.7066e+05
      iterations: 12
      funcCount: 65
  constrviolation: 5.6843e-14
      stepsize: 7.2468e-06
      algorithm: 'interior-point'
 firstorderopt: 2.0000e-06
      cgiterations: 0

```

элементов, скорости саморазряда, деградации, воздействия на окружающую среду и др. Решение указанной задачи позволяет определить параметры систем накопления и для других объектов системы тягового электроснабжения [20–23].

Выводы

Предложенный вариант применения системы накопления электроэнергии позволяет сократить электропотребление на собственные нужды за счёт использования энергии рекуперации и обеспечить прием избыточной энергии рекуперации на шины тяговой подстанции постоянного тока.

Особенностями работы систем накопления для собственных нужд тяговых подстанций является превышение мощности заряда над мощностью разряда, необходимость существенного увеличения энергоёмкости для ограничения глубины разряда при использовании накопителей электрохимического вида, кратковременность эпизодов заряда, средняя продолжительность которых составляет около пяти минут. Указанные особенности обуславливают применение видов накопителей, отличных от электрохимических, использование гибридных систем, способных осуществлять быструю зарядку, глубина разряда которых не оказывает влияние на ресурс работы.

Предложено два варианта подключения системы накопления электроэнергии к собственным нуждам тяговой подстанции, отличающихся мощностью преобразователей.

На основе имитационного моделирования работы накопителей гибридной системы накопления получены результаты изменения коэффициентов использования энергии рекуперации, собственных нужд, в т.ч. отдельно по накопительным элементам системы.

Предложена математическая модель, позволяющая на основе изменения коэффициентов использования энергии рекуперации и собственных нужд по накопительным элементам определить мощность и энергоёмкость системы накопления по критерию стоимости системы.

Полученные результаты решения позволяют оценить параметры гибридной системы накопления электроэнергии для собственных нужд тяговых подстанций на сети железных дорог России и за рубежом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rahman, F., Rehman, S., Abdul-Majeed, M. A. Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, Vol. 16 (1), pp. 274–283. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.153.
2. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglabe, A., Rosehart, W. Energy storage for mitigating the variability of

renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 2010, Vol. 14 (4), pp. 302–314. DOI: 10.1016/j.esd.2010.09.007.

3. Qinglong, Meng; Yang, Li; Xiaoxiao, Ren; Chengyan, Xiong; Wenqiang, Wang; Jiwei, You. A demand-response method to balance electric power-grids via HVAC systems using active energy-storage: Simulation and on-site experiment. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, pp. 762–777. DOI: doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.083.

4. Jiang, Shaohan; Li, Yongping; Suo, Cai. IFQP-EPS: Analyzing effects of queuing and storage issues on electric power systems under dual uncertainties. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, Vol. 145, pp. 241–260. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.023.

5. Oldenbroek, V., Verhoef, L. A., van Wijk, A. J. M. Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, Vol. 42 (12), pp. 8166–8196. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.155.

6. Calise, F., Cappiello, F. L., Carteni, A., Dentice d'Accadia, M., Vicidomini, M. A novel paradigm for a sustainable mobility based on electric vehicles, photovoltaic panels and electric energy storage systems: Case studies for Naples and Salerno (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, pp. 111, 97–114. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.022.

7. Fletcher, D. I., Harrison, R. F., Nallaperuma, S. TransEnergy – a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems. *Journal of Energy Storage*, 2020, Vol. 30, 101425. DOI: 10.1016/j.est.2020.101425.

8. Ebadi, R., Yazdankhah, A. S., Mohammadi-Ivatloo, B., Kazemzadeh, R. Coordinated power and train transportation system with transportable battery-based energy storage and demand response: A multi-objective stochastic approach. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 123923. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123923.

9. Rebrov I., Kotelnikov A., Ermolenko D., Shevlyugin M. Electric power accumulators in system of supplying railways with traction energy by direct current 2018, TS 2018, MATEC Web of Conferences, 2018, pp. 01057.

10. Буйносов А. П., Дурандин М. Г., Тутынин О. И. Перспективы использования накопителей электрической энергии на моторвагонном подвижном составе // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. – 2020. – № 4 (48). – С. 35–45. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44543617>. Доступ 27.04.2021.

11. Валинский О. С., Евстафьев А. М., Никитин В. В. Эффективность процессов энергообмена в тяговых электроприводах с бортовыми ёмкостными накопителями энергии // *Электротехника*. – 2018. – № 10. – С. 10–14. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35671043>. Доступ 27.04.2021.

12. Черемисин В. Т., Кондратьев Ю. В., Привалов С. Я. и др. Анализ возможности применения сальдированного учёта электроэнергии на тягу поездов // *Известия ПГУПС*. – 2008. – № 8. – С. 219–232. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11913819>. Доступ 27.04.2021.

13. Незевак В. Л., Самолинов С. С., Хусаинов Е. К. Оценка эффективности применения систем накопления электроэнергии для обеспечения собственных нужд тяговых подстанций постоянного тока // *Материалы IV международной научно-*

практической конференции в рамках Научно-образовательного форума. – Омск. – 2020. – С. 49–56. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45736176>. Доступ 27.04.2021.

14. Незевак В. Л. Влияние пороговых напряжений системы накопления электроэнергии на энергетические показатели тягового электроснабжения // *Вестник транспорта Поволжья*. – 2020. – № 4 (82). – С. 28–37. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44249610>. Доступ 27.04.2021.

15. Незевак В. Л. Определение мощности и энергоёмкости систем накопления электроэнергии для улучшения эксплуатационных показателей тягового электроснабжения // *Известия Транссиба*. – 2020. – № 2 (42). – С. 9–25. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-moschnosti-i-energoemkosti-sistem-nakopleniya-elektroenergii-dlya-uluchsheniya-ekspluatatsionnyh-pokazateley-tyagovogo-pdf>. Доступ 27.04.2021.

16. Шевлюгин М. В., Голицына А. Е., Белов М. Н. и др. Повышение надёжности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии // *Электротехника*. – 2020. – № 9. – С. 26–31. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44000555>. Доступ 27.04.2021.

17. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // *Мир транспорта*. – 2018. – № 2 (75). – С. 84–94. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.epub.ru/jour/article/view/1436>. Доступ 27.04.2021.

18. Черемисин В. Т., Незевак, В. Л. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце // *Бюллетень результатов научных исследований*. – 2020. – № 2. – С. 33–44. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-primeniya-sistem-nakopleniya-elektroenergii-na-moskovskom-tsentralnom-koltse>. Доступ 27.04.2021.

19. Nezevak, V., Cheremisin, V., Shatokhin, A. Operating modes of electric energy storage systems on the Moscow Central Ring. *E3S Web of Conferences*, 2019, Vol. 135, No. 01063. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501063.

20. Доманов К. И., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Исследование режимов работы системы тягового электроснабжения в целях установки накопителя электрической энергии // *Известия Транссиба*. – 2018. – № 2 (34). – С. 65–75. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-rezhimov-raboty-sistemy-tyagovogo-elektrosnabzheniya-v-tselyah-ustanovki-nakopiteley-elektricheskoy-energii-pdf>. Доступ 27.04.2021.

21. Nezevak, V., Cheremisin, V., Shatokhin, A. Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring. *8th International Scientific Siberian Transport Forum. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1115, pp. 42–51. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2.

22. Nezevak, V., Cheremisin, V. Determination of electric energy storage units parameters of direct current traction power supply in conditions of goods traffic dominance. *FarEastCon*, 2020, Article number 9271611, Category number CFP20M35-ART. Code 165655. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271611.

23. Nezevak, V., Cheremisin, V., Shatokhin, A. Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 982, pp. 524–538. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_50.

Информация об авторе:

Незевак Владислав Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, NezevakWL@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 25.03.2021, одобрена после рецензирования 15.06.2021, принята к публикации 01.07.2021.

