

Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности



В. Т. Черемисин,
доктор техн. наук,
профессор, заведующий
кафедрой «Подвижной
состав электрических
железных дорог»,
проректор по научной
работе и инновациям,
Омский государственный
университет путей
сообщения (ОмГУПС)



М. М. Никифоров,
канд. техн. наук,
начальник научно-
производственной
лаборатории
«Энергосберегающие
технологии
и электромагнитная
совместимость»,
ОмГУПС



В. Л. Незевак,
канд. техн. наук,
старший научный
сотрудник научно-
исследовательской
части, ОмГУПС

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте постоянно нуждается в повышении энергоэффективности. Появление новых технологий в области разработки накопителей электрической энергии (НЭЭ) влечет за собой необходимость оценивать эффективность работы существующих и перспективных видов данных устройств в системе тягового электроснабжения (СТЭ). Требуют решения задачи стабилизации напряжения в контактной сети, выравнивания графика нагрузки тяговой подстанции, использования энергии рекуперативного торможения и снижения уровня потерь в элементах СТЭ.

В первую очередь должно рассматриваться применение НЭЭ на полигоне постоянного тока, а точнее — тех участков, на которых используется рекуперативное торможение. Это обусловлено как задачей повышения энергоэффективности перевозок, так и сопутствующей задачей обеспечения процесса рекуперативного торможения (повышение безопасности движения) и выравнивания графика нагрузок и стабилизации напряжения в СТЭ. На полигоне переменного тока проблемы возврата энергии рекуперации нет, и поэтому рассматривать установку НЭЭ в СТЭ на полигоне переменного тока нецелесообразно.

Стоимость производимых в настоящее время НЭЭ накладывает существенные ограничения на уровень энергоемкости НЭЭ и, как следствие, сужает перечень мест его возможной установки. Необходимо учитывать также и ряд других факторов:

- режим нагрузки на шинах тяговой подстанции, определяемый профилем пути и размерами движения;
- унифицированную массу поездов, обращающихся на рассматриваемых участках;
- количество электрифицированных путей участка;
- применение электрического подвижного состава (ЭПС) с возможностью рекуперативного торможения и др.



ФОТО: СЕРГЕЙ ТЮРИН

Перспективы использования различного вида НЭЭ широки. Например, в [1] в качестве одного из путей развития ЭЭС и России в ближайшем будущем рассматривается массовое применение НЭЭ различной физической природы (сверхпроводниковых индукционных, конденсаторных, аккумуляторных) и типов (теплофикационные сети городов, системы нетрадиционных возобновляемых источников энергии).

Перспективными видами накопителей на транспорте принято считать следующие [2–5]:

- емкостные накопители электрической энергии на основе молекулярных суперконденсаторов;
- накопители электрической энергии на основе сверхпроводимости — сверхпроводниковые индуктивные накопители;
- электромеханические индуктивные накопители электрической энергии.

Основным недостатком существующих НЭЭ являются их низкая удельная запасаемая энергия (Дж/кг), низкая реализуемая мощность, а также высокая стоимость и большие массогабаритные размеры устройств. Так, энергия рекуперативного торможения, реализуемая

электропоездом Московского метрополитена, составляет около 46 МДж (или около 165 кВт·ч), а габариты накопителя требуют размещения в трех вагонах поезда [3].

Пока наибольшее распространение получили накопители на аккумуляторных батареях большой емкости. За рубежом реализованы и применяются не только в области городского электротранспорта, но и в системе метро следующие разновидности таких накопителей [6]:

- серно-кислотные — до 20 МВт (резервирование и поддержание частоты маломощной сети Пуэрто-Рико; время работы — до 15 мин);
- никель-кадмиевые — до 40 МВт (GVEA, обеспечение бесперебойного электроснабжения прибрежных районов Аляски вблизи г. Анкоридж; время работы — до 15 мин);
- серно-натриевые — до 34 МВт (ветряная станция Rokkacho, Япония; время работы — до 600 мин).

Энергоемкость накопителей данного вида оценивается на уровне от 5 тыс. до 340 тыс. кВт·ч, или от 18 ГДж до 1,22 ТДж.

Одним из принципиальных вопросов является выбор места расположения

НЭЭ по критерию энергоэффективности [7, 8]. Рассмотрим два основных варианта размещения НЭЭ на ЭПС и на стационарных объектах СТЭ.

Размещение накопителей на электрическом подвижном составе

Для оценки энергии рекуперативного торможения на каком-либо участке полигона постоянного тока железной дороги следует обратиться к соответствующим тяговым расчетам. В качестве примера рассмотрим результаты тяговых расчетов в нечетном и четном направлении для локомотива ВЛ 10 (масса поезда 4200 т) на одном из двухпутных участков Западно-Сибирской железной дороги (рис. 1, 2). В данном случае максимальная величина энергии рекуперативного торможения достигает для нечетного и четного направлений следования, соответственно, 654 и 725 кВт·ч (2,4 и 2,6 ГДж).

Электрические расчеты без НЭЭ на ЭПС позволяют оценить потенциальный объем энергии рекуперации, который можно вернуть на шины тяговых подстанций при установке инвертора для соответствующих условий. Для рас-

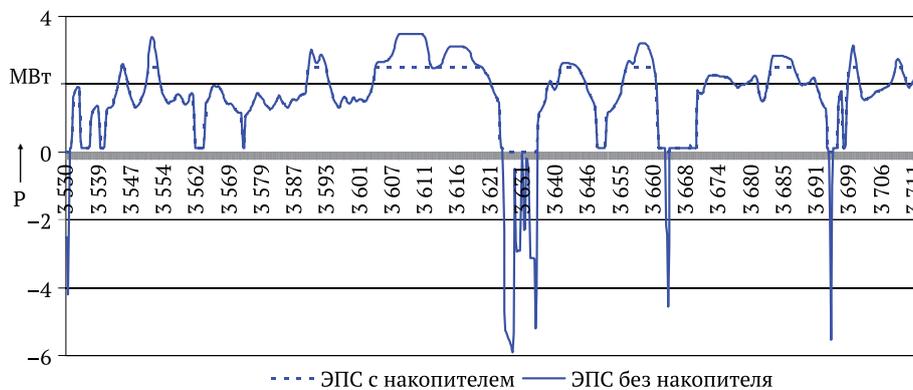


Рис. 1. График мощности поезда (ВЛ 10) в нечетном направлении

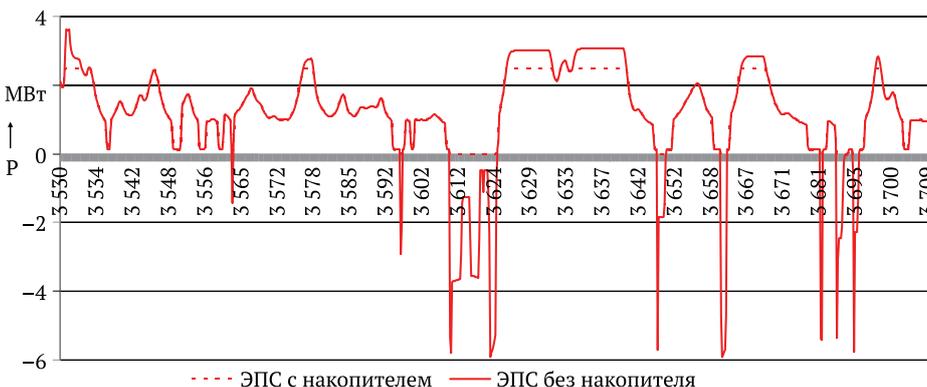


Рис. 2. График мощности поезда (ВЛ 10) в четном направлении

Таблица 1. Величина возврата энергии рекуперации на участке Западно-Сибирской железной дороги

Тяговая подстанция	Возврат энергии рекуперации при движении поездов по обоим путям в четном и нечетном направлениях, кВт·ч в сутки	
	По шинам тяговых подстанций	В пересчете на один поезд
1	3896	77,9
2	4122	82,4
3	1047	20,9
4	572	11,4
5	1686	33,7
6	2497	49,9
7	3166	63,3
8	3482	69,6
9	2225	44,5
10	2555	51,1
11	3223	64,5
12	1398	28,0
13	75	1,5
14	0	0,0
15	0	0,0
Среднее значение	1996,3	39,9
Сумма	29944	–

смаатриваемого случая величина возврата электрической энергии в случае установки инверторов на тяговых подстанциях составит около 30 тыс. кВт·ч в сутки (табл. 1).

Оценивалось применение НЭЭ на ЭПС при условии, что энергоемкость накопителя, размещенного на соответствующем локомотиве, рассчитана на полное поглощение энергии рекуперации грузового поезда. Разряд накопителя

происходит при условии реализации полезного объема ранее накопленной электрической энергии, при этом начало заряда соответствует началу рекуперативного торможения локомотива (рис. 1, 2). Результаты расчета расхода электрической энергии по тяговым подстанциям (для энергоемкости накопителя на ЭПС, равной 40 кВт·ч) представлены на рис. 3. Электрические расчеты на основе тяговых расчетов для ЭПС с НЭЭ дают следу-

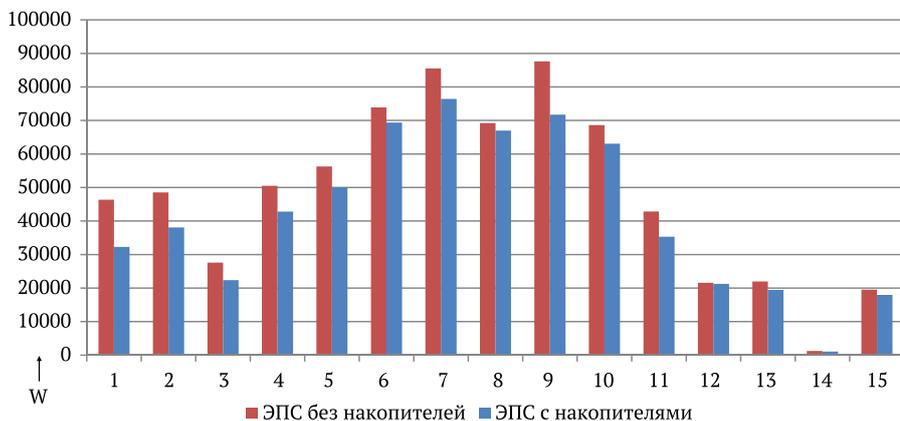


Рис. 3. Расход электрической энергии тяговых подстанций на тягу поездов в сутки по исследуемому участку Западно-Сибирской железной дороги

ющие результаты (табл. 2): сокращение расхода электрической энергии на тягу на величину до 12,9 %; сокращение потерь энергии в тяговой сети на 4,6 %; повышение пропускной способности участка на 50,5 %.

Применение НЭЭ на ЭПС, как показывают расчеты, позволяет снизить максимальные коэффициенты загрузки выпрямителей, преобразовательных и понижающих трансформаторов тяговых подстанций, а также повысить минимальный уровень напряжения в контактной сети. Данный эффект основан на снижении пиковой мощности поезда, выравнивании графика нагрузки тяговых подстанций, что приводит к сокращению потерь электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций.

Несмотря на высокие потенциальные показатели работы СТЭ при применении накопителей на ЭПС, существует ряд ограничений, которые необходимо учитывать. Так, уже были названы ограничения, связанные со стоимостью существующих устройств и достаточно большими габаритами. Кроме того, размещение НЭЭ на грузовом ЭПС на участках с высокой удельной рекуперацией обуславливает необходимость оценки суммарной мощности накопителей на грузовых локомотивах, обращающихся на участке.

Например, для полигона постоянного тока протяженностью 1000 км количество грузовых локомотивов может составлять около 100 единиц (если принять размеры грузового движения около 50 пар в сутки, а участковую скорость — на уровне 40 км/ч). Количество тяговых подстанций (при среднем размещении через 20 км) составит на рассматриваемом участке не более 50. Размещение НЭЭ на каждой подстанции участка нецелесообразно вследствие малого ожидаемого возврата энергии рекуперации или наличия на подстанциях выпрямительно-инверторных преобразователей. Таким образом, количество НЭЭ для рассматриваемого участка на тяговых подстанциях по экспертным оценкам не превышает 10–15 единиц. В этом случае количество требуемых НЭЭ на ЭПС превышает количество НЭЭ на тяговых подстанциях в несколько раз.

Следовательно, при оценке энергоэффективности применения НЭЭ необходимо сопоставлять энергетические показатели СТЭ при размещении накопителей на ЭПС и на стационарных объектах СТЭ.

Таблица 2. Результаты электрических расчетов для участка Западно-Сибирской железной дороги

№	Показатель	ЭПС без накопителя	ЭПС с накопителем	Изменение, %
1	Расход энергии, %	100	81,1	-12,9
2	Потери в тяговой сети, %	6,5	1,9	-4,6
3	Минимальное напряжение, В	2888	3300	+14,3
4	Коэффициент нагрузки понижающего трансформатора	1,39	0,49	-64,7
5	Коэффициент нагрузки преобразовательного трансформатора	0,9	0,28	-68,9
6	Пропускная способность (нечет/чет), %	100	150,5	-50,5
7	Минимальный межпоездной интервал, мин	12	8	-30,3

Размещение накопителей на тяговых подстанциях

Общий подход к вопросу о размещении НЭЭ на стационарных объектах СТЭ, в том числе на тяговых подстанциях (ТПС), аналогичен решению вопроса о размещении НЭЭ на ЭПС. Подключение НЭЭ на полигоне постоянного тока возможно путем размещения их на стационарных объектах СТЭ: тяговых подстанциях, постах секционирования и пунктах параллельного соединения.

Решение данного вопроса основано на анализе следующих факторов:

- характеристики профиля пути;
- объем возврата электрической энергии в контактную сеть;
- перечень мест возможной установки НЭЭ на стационарных объектах;
- удельный вес грузового движения;
- массы грузовых поездов;
- сезонность перевозок;
- межпоездные интервалы;
- другие факторы, оказывающих влияние на энергетическую эффективность работы НЭЭ при его установке на ТПС и других стационарных объектах.

Анализ данных факторов позволяет подойти к оценке таких параметров НЭЭ, как:

- энергоемкость;
- максимальная мощность рекуперативного торможения (заряда) и нагрузки тяги (разряда) на участке;
- прогнозируемое количество циклов потребления/возврата электрической энергии;
- нормативное количество циклов заряд/разряд;
- срок службы и др.

Объем возврата электрической энергии может быть определен на основе имитационного моделирования для фактических условий рассматриваемого

участка (размеры движения; параметры СТЭ; типы локомотивов и др.). Продольный профиль пути, определяющий величину возврата электрической энергии по шинам тяговых подстанций, оказывает влияние и на выбор параметров НЭЭ. Поэтому для ограничения необходимой энергоемкости НЭЭ их размещение представляется рациональным на участках с переменным продольным профилем пути (с неоднократными спусками и подъемами в пределах ограничивающих межподстанционных зон и переменной нагрузкой на шинах ТПС).

Помимо ожидаемого сокращения потребления электрической энергии на тягу может быть получен и сопутствующий эффект, заключающийся в выравнивании графика электрической нагрузки тяговых подстанций, стабилизации напряжения в месте подключения НЭЭ, а также в снижении уровня потерь в преобразовательных трансформаторах (тяговой сети).

Одним из факторов, ограничивающих применение НЭЭ на стационар-

ных объектах, является использование устройств автоматического регулирования напряжения. Типичный график нагрузки ТПС на примере одной из ТПС Свердловской железной дороги представлен на рис. 4 и иллюстрирует степень неравномерности мощности и динамику изменения напряжения. В случае стабилизации напряжения, например, на уровне 3500–3600 В эффективность использования НЭЭ будет существенно ограничена.

Работа НЭЭ на ТПС приводит к незначительному увеличению потерь электроэнергии, как это показано на примере участка Западно-Сибирской железной дороги [9]. Из сравнения показателей (табл. 2, 3) видно, что размещение НЭЭ на ЭПС позволяет достичь более высоких показателей работы СТЭ постоянного тока, поскольку существенно сокращает загрузку выпрямителей, преобразовательных и понижающих трансформаторов, а также дает возможность сократить потери электрической энергии в тяговой

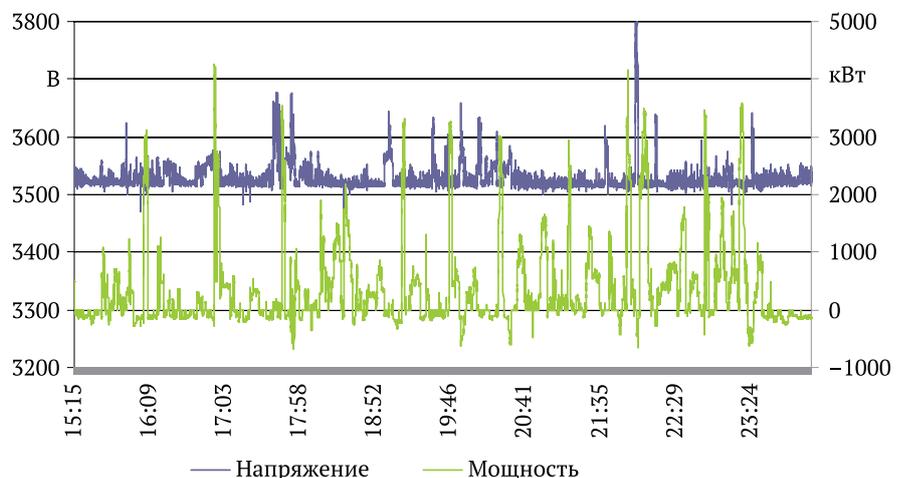


Рис. 4. График мощности тяговой нагрузки на шинах ТПС и напряжения на шинах

Таблица 3. Результаты электрических расчетов для одной из ТПС Западно-Сибирской железной дороги

№	Показатель	ТПС без накопителя	ТПС с накопителем	Изменение, %
1	Расход энергии, кВт·ч	100	93,6	-6,4
2	Потери в тяговой сети, %	3,5	3,6	+0,1
3	Минимальное напряжение, В	3017	3052	+1,2
4	Коэффициент нагрузки понижающего трансформатора	0,25	0,23	-8,0
5	Коэффициент нагрузки преобразовательного трансформатора	0,16	0,15	-6,2
6	Пропускная способность (нечет/чет), %	100	100	-
7	Минимальный межпоездной интервал, мин	12	12	-

сети. Установка НЭЭ на ЭПС, в отличие от установки НЭЭ на ТПС (или других объектах СТЭ), позволяет увеличить пропускную способность, что особенно важно для лимитирующих участков.

Оценка эффективности использования НЭЭ на ЭПС и ТПС выполнена для полезной мощности НЭЭ. Установленную мощность НЭЭ необходимо определять с учетом следующих коэффициентов: полезного действия; запаса; коэффициента, учитывающего невозможность полной разрядки накопителя (так называемая мертвая зона накопителя).

Следует отметить и тот факт, что размещение НЭЭ на ТПС или других стационарных объектах (пост секционирования или пункт параллельного соединения) не позволяет существенно улучшить энергетические характеристики работы СТЭ. Если применение НЭЭ на ЭПС дает возможность сократить потери в СТЭ в целом, а также повысить пропускную способность участка, то применение НЭЭ на ТПС приводит только к незначительному улучшению энергетических характеристик работы преобразовательных агрегатов и трансформаторов ТПС (снижает коэффициенты загрузки данного оборудования), но не ведет к значительному изменению пропускной способности участка.

Выводы

Применение НЭЭ в тяговой энергетике на железнодорожном транспорте возможно как на стационарных объектах СТЭ (тяговых подстанций, постах секционирования, пунктах параллельного соединения или автотрансформаторных пунктах), так и на электроподвижном составе (грузовых и пассажирских электровозах, а также моторвагонном подвижном составе). Выбор места расположения НЭЭ весьма значим, по-

скольку не только оказывает влияние на потери электрической энергии в элементах СТЭ, но и определяет эффективность проектов по применению накопителей на указанных объектах.

Использование НЭЭ как на ЭПС, так и на ТПС позволяет улучшить эффективность работы СТЭ. Применение НЭЭ на ЭПС, кроме этого, способствует повышению пропускной способности участка. Показатели эффективности НЭЭ на ТПС по сравнению с НЭЭ на ЭПС ниже, поскольку характеризуются меньшим снижением загрузки выпрямителей, преобразовательных агрегатов и трансформаторов ТПС.

В числе главных недостатков применения НЭЭ на ЭПС — высокая суммарная энергоемкость (на парк эксплуатируемых локомотивов по сравнению с количеством тяговых подстанций) и сложность разработки технических решений по размещению данных устройств на ЭПС различных серий с учетом массогабаритных характеристик НЭЭ.

НЭЭ обладают принципиальным преимуществом перед инверторами несмотря на имеющееся технологическое несовершенство, заключающееся в возможности отдачи в контактную сеть ранее накопленной энергии рекуперативного торможения, которого лишены инверторы тяговых подстанций. ■

Литература

1. Воронин В. А., Любарский Д. Р., Макаровский С. Н. и др. О возможном пути развития ЕЭС России на базе широкого использования накопителей энергии // Электрические станции. 2012. № 5. С. 14.
2. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р. и др. Накопители энергии / под ред. Д. А. Бута. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.

3. Шевлюгин М. В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии // Прил. к журн. «Мир транспорта». № 1, т. 4. М.: МГУПС. 2007. С. 35–38.
4. Васильев В. А. Тяговый привод с емкостным накопителем энергии // Сб. тр. всерос. науч.-практич. конф. «Транспорт-2010». Ростов-н/Дону, 2010. С. 291–293.
5. Устенко А. В., Пасько О. В. Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов // Науч. мысль. 2012. № 10. С. 4–6.
6. Бычкова М. Энергоэффективные технологии метро // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2011. № 5 (22). С. 34–36.
7. Незевак В. Л., Вильгельм А. С. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: мат-лы науч.-пракч. конф. Омск: ОмГУПС, 2013. 242 с.
8. Незевак В. Л., Плотников Ю. В., Шатохин А. П. Направления стабилизации уровня напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока с помощью накопителя электроэнергии // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. I междунар. (IV всерос.) науч.-технич. конф. Уфа: «Нефтегазовое дело», 2013. 302 с.
9. Черемисин В. Т., Вильгельм А. С. Оценка способов повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях рекуперации электроподвижного состава // The 6 Int. Symp. for Transp. Univ. in Europe and Asia / Korea nat. univ. of transp.: 50 Daehak-ro, Chugji-si. Chungbuk, 2013. С. 147–151.