



Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии



Владислав НЕЗЕВАК
Vladislav L. NEZEVAK

Андрей ШАТОХИН
Andrey P. SHATOKHIN



Features of the Traction Load for Determining the Parameters of the Electric Energy Storage Device

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 90)

На основе данных при эксплуатации локомотивов серий 2ЭС6 и 2ЭС10 выявлены усреднённые параметры работы накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока на линиях с тяжеловесными и длинносоставными поездами. Режимам действия накопителей свойствен кратковременный характер. Усреднённая по случаям продолжительность их работы в режиме заряда примерно 100 с, а объём возвращаемой энергии электроподвижным составом, определяющий энергоёмкость, составляет в среднем 100 кВт•ч, при этом максимальная мощность – 7,1 МВт. Обработка результатов измерений показывает, что наблюдаемые распределения напряжений и тяговой нагрузки подстанции Гауссовским законам не подчиняются.

Ключевые слова: железная дорога, система тягового электроснабжения, тяжеловесное движение, тяговая нагрузка, энергетическая эффективность, пост секционирования, накопитель электроэнергии, электроподвижной состав, эксперимент.

Незевак Владислав Леонидович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской части, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия.

Шатохин Андрей Петрович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры подвижного состава электрических железных дорог Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия.

Возникновение тяжеловесного движения на железных дорогах мира связано с потребностью добиться более экономичного способа перевозок. Организация маршрутов с повышенными нагрузками привела к появлению поездов массой до 20 000 тонн в Китае [1], 14 000–16 000 тонн в США [2], до 48 000 тонн в Австралии [3] и других странах [4].

Развитие тяжеловесного движения на сети дорог России обуславливает иные требования к системе тягового электроснабжения (СТЭ) по обеспечению пропускной и провозной способности, нежели те, что предусматривались проектными показателями электрификации 1960–1980-х годов, подразумевавшими пропуск грузовых поездов массой до 5000 тонн с интервалами попутного следования до 20 минут. Увеличение весовых норм поездов и сокращение минимальных интервалов выявило целый ряд участков, лимитирующих пропускную и провозную способность.

С 2006 года для обеспечения основного направления развития сети – пропуска поездов массой 6000 тонн и выше с интервалом попутного следования до 10 минут – в хозяйстве электроснабжения холдинга

«РЖД» проводится систематическая работа по усилению СТЭ, в том числе это касается линий постоянного тока, применения буферной СТЭ, повышения напряжения в контактной сети до 12 или 24 кВ либо перехода на переменный ток [5].

Одним из альтернативных вариантов усиления СТЭ постоянного тока на участках с организацией тяжеловесного и длинносоставного движения поездов являются системы накопления электроэнергии. Они используются в передовой мировой практике на пассажирском городском транспорте, например, при эксплуатации 24-метровых автобусов [6], или на гибридных легковых автомобилях и локомотивах с литий-ионными батареями и топливными элементами [7, 8]. Учитывая особенности СТЭ постоянного тока, можно ожидать ощутимый эффект от применения накопителей электроэнергии на железных дорогах.

Основным фактором, связанным с появлением «лимитирующих» межподстанционных зон, является низкое напряжение на токоприёмнике, обусловленное режимами работы электроподвижного состава (ЭПС) и потерями напряжения в тяговой сети. И здесь очень важен выбор места размещения накопителя электроэнергии как можно ближе к источнику генерации и потребления энергии. В системе тягового электроснабжения наиболее эффективным с технической точки зрения определено для этих целей линейное устройство — пост секционирования контактной сети или пункт параллельного соединения [9–11].

Работы по накопителю электроэнергии и определению его параметров ведутся относительно давно, но применение этих устройств ограничено в первую очередь их высокой стоимостью и большим сроком окупаемости. В то же время технический эффект от накопителей электроэнергии несомненен. В настоящее время существует достаточно широкий выбор типов и типоразмеров, включая индуктивные накопители на сверхпроводниках, суперконденсаторы (ионисторы), аккумуляторы [12] и т.п. Необходимо отметить, что подобные средства и различного рода схемные решения для осуществления заряда и последующего разряда энергии в сеть рассматрива-

ются и при организации «умных» сетей Smart Grid [13–15], позволяющих повысить качество управления их режимами.

Применение накопителей энергии на посту секционирования позволяет сократить уровень электропотребления по тяговому подстанциям за счёт повышения эффективности рекуперативного торможения, увеличить средний уровень напряжения на токоприёмнике электроподвижного состава и снизить средний ток тяговой нагрузки, что способствует увеличению пропускной и провозной способности участка железной дороги [11].

Основные параметры, которые определяют режим работы накопителя электроэнергии, следующие: номинальная мощность, энергоёмкость, перегрузочная способность, время заряда и саморазряда, глубина разряда, ресурс работы и капитальные затраты. Все они касаются СТЭ, особенностью которых является резко неравномерный характер показателей, обусловленный неравномерностью графика движения поездов. Кроме этого, в условиях роста массы поезда и перехода на тяжеловесное движение возрастают пиковые нагрузки на СТЭ, что приводит к ещё большей неравномерности суточного графика нагрузки тяговых подстанций. С целью выявления предельных режимов работы рассмотрим суточные графики нагрузки и напряжения на шинах 3,3 кВ одной из тяговых подстанций на участке обращения тяжеловесных поездов Тайга—Мариинск Западно-Сибирской железной дороги, профиль пути которого относится к III типу (рис. 1).

На подстанции установлены неуправляемые выпрямители с 12-пульсовой схемой последовательного типа (преобразовательные трансформаторы марки ТРДП-12500/10 и выпрямители марки ТПДЕ-Ж-3,15к-3,3 и ПВЭ-5АУ1). Измерения напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции постоянного тока участка Тайга—Мариинск выполнены при помощи блоков регистрации БРТН-3,3 с односекундной детализацией.

Проверка гипотез о соответствии наблюдаемого распределения напряжения и тока нагрузки подстанции теоретическому закону показывает, что по критерию Пирсона [16]



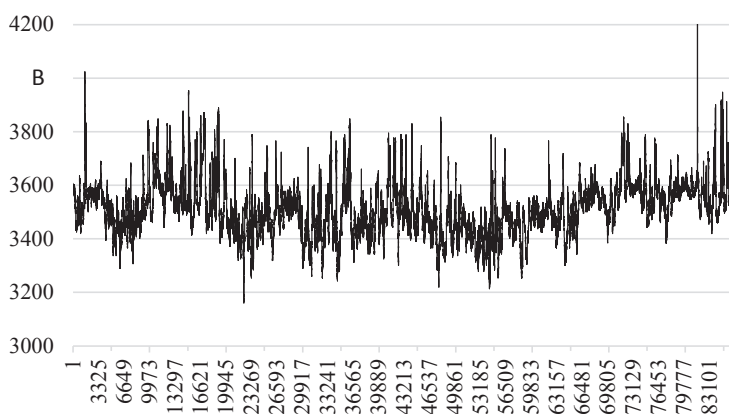


Рис. 1. График изменения напряжения на шинах тяговой подстанции в течение суток.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_{\text{теор}} - n_i)^2}{n_{\text{теор}}}, \quad (1)$$

где $n_i, n_{\text{теор}}$ — наблюдаемые и теоретические частоты; k — число диапазонов наблюдаемых значений, определяемых по формуле Стеджеса (Sturges), в данном случае соответствия гауссовским законам распределения не обнаруживается. Так, напряжение на шинах 3,3 кВ превышает табличное значение в несколько раз (свыше 1000 против $\chi^2 5,89$ для доверительной вероятности 0,95 и количества степеней свободы 13).

Полученное распределение (рис. 1) существенно не изменяется по суткам. Однородность суточных выборок напряжения на шинах 3,3 кВ рассматриваемой тяговой подстанции подтверждена с помощью непараметрического критерия Колмогорова [17–18]:

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |P_i^*(x) - P_j^*(x)|, \quad (2)$$

где $P_i^*(x), P_j^*(x)$ — частоты распределения экспериментальных данных и теоретического распределения соответственно.

Критическое значение критерия Колмогорова для двух выборок определяется по выражению

$$D_{\text{кр}} = 1,36 \cdot \sqrt{\frac{n+m}{n \cdot m}}, \quad (3)$$

где n и m — объёмы сравниваемых выборок.

Оно рассчитано при доверительной вероятности 0,95 и количестве интервалов группирования 16 и равно 0,48. В результате расчётов для трёх случаев (трое суток наблю-

дения) выборки напряжения на шинах 3,3 кВ для кумулятивных частот различаются незначительно. Максимальное значение критерия Колмогорова для пар различных суток составляет 0,13, что значительно меньше критического. Принимая выборки однородными, полученные распределения могут быть использованы при характеристике режима напряжения для усреднённых суток.

Результаты обработки ряда поездок для локомотивов серий 2ЭС6 и 2ЭС10 с поездами различных масс, в том числе тяжело-весными и длинносоставными, позволяют получить внешнюю характеристику локомотива, наблюдаемую на участках его работы. Данные по полигонам обращения на Западно-Сибирской, Южно-Уральской и Свердловской железных дорогах представлены на рис. 2.

Для локомотивов обеих серий уровень нагрузки лежит в диапазоне 0–2000 А, а напряжение на токоприёмнике в диапазоне 3200–3900 В, однако наблюдаемый наклон внешней характеристики различен. При линейной аппроксимации данных коэффициент наклона для серии 2ЭС6 составляет «–0,0687», для 2ЭС10 — «–0,14». Более крутой характер суммарной нагрузочной характеристики для серии 2ЭС10 обусловлен условиями эксплуатации — она осуществляется при наличии горного профиля пути (IV-го типа), а отсюда и уровень напряжения на токоприёмнике локомотива.

Выполненные измерения позволяют определить рабочий диапазон напряжений для накопителя электроэнергии при его работе в режиме заряда. Учитывая уровень напряжения холостого хода, нижнюю гра-

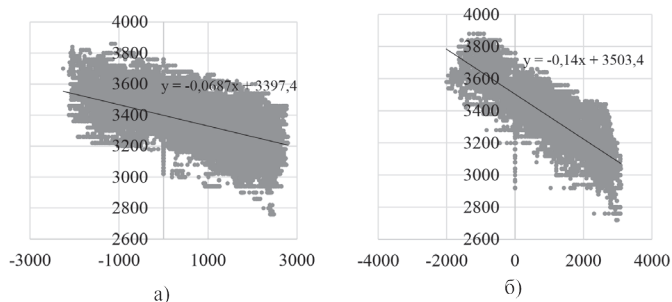


Рис. 2. Результаты измерений для локомотивов 2ЭС6 (а) и 2ЭС10 (б).

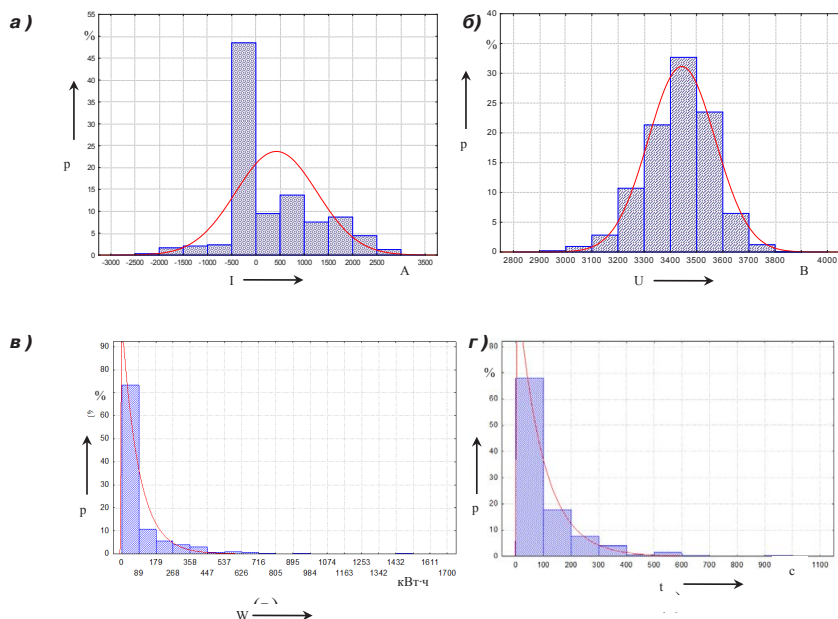


Рис. 3. Распределение значений токов (а), напряжения на токоприёмнике (б), энергии рекуперации (в), продолжительности эпизодов рекуперативного торможения (г) электровозов серии 2ЭС6.

ницу напряжения при переходе накопителя в режим заряда следует принять не ниже 3600–3650 В. При размещении накопителя электроэнергии на посту секционирования для обеспечения зарядки малыми токами напряжение должно быть снижено на 50–100 В.

На рис. 3 представлено распределение значений токов в различных режимах работы локомотива серии 2ЭС6 (а), напряжения на токоприёмнике (б), энергии рекуперации (в), продолжительности эпизодов рекуперативного торможения (г).

Количество наблюдаемых значений за исследуемый период времени составило 65 536, среднее значение тока – 423 А, максимальное в режиме тяги – 2799 А, максимальное в режиме рекуперации – 2121 А, среднее квадратическое отклонение – 842,0. Наиболее наблюдаемое значе-

ние возврата энергии лежит в диапазоне от 0 до 89 кВт·ч. Наиболее наблюдаемая продолжительность эпизодов рекуперативного торможения находится в диапазоне от 0 до 100 с.

На рис. 4 дано распределение значений токов в различных режимах работы электровоза серии 2ЭС10 (а), напряжения на токоприёмнике (б), энергии рекуперации (в), продолжительности эпизодов рекуперативного торможения (г).

Количество наблюдений составило 27 307, среднее значение тока – 626,2 А, максимальное в режиме тяги – 3096 А, максимальное в режиме рекуперации – 2008 А, среднее квадратическое отклонение – 1174,6. Наиболее наблюдаемое значение возврата энергии лежит в диапазоне от 0 до 100 кВт·ч. Наиболее вероятная длительность эпизода рекупе-



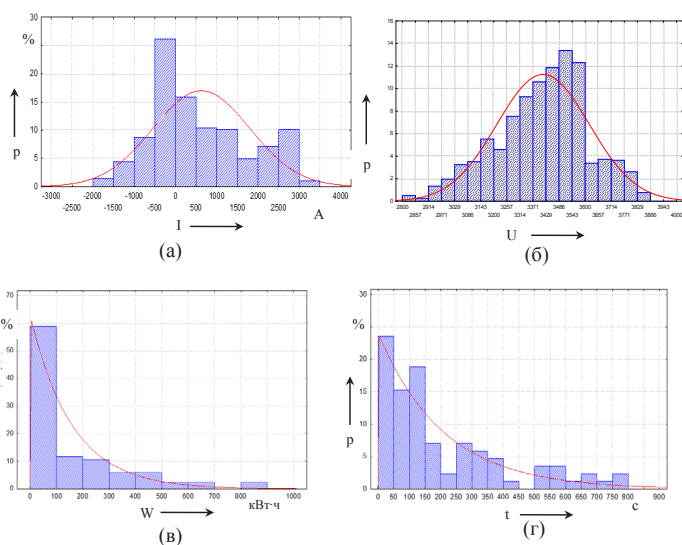


Рис. 4. Распределение значений токов (а), напряжения на токоприёмнике (б), энергии рекуперации (в), продолжительности эпизодов рекуперативного торможения (г) электровозов серии 2ЭС10.

Таблица 1

**Наиболее наблюдаемые значения электрических параметров
в режиме рекуперативного торможения**

Параметры	2ЭС6		2ЭС10	
Ток	0–600 А	(90 %)	0–500 А	(70 %)
Напряжение	3400–3600 В	(30 %)	3400–3600 В	(35 %)
	> 3600	(10 %)	> 3600	(15 %)
Объём электроэнергии	0–90 кВт·ч	(70 %)	0–100 кВт·ч	(55 %)
Продолжительность эпизодов	0–100 с	(70 %)	0–100 с	(40 %)

ративного торможения — в диапазоне от 0 до 100 с.

Помимо прочего появляется возможность выделить и наиболее наблюдаемые электрические величины, характеризующие режим рекуперативного торможения для локомотивов 2ЭС6 и 2ЭС10 (таблица 1).

Результаты обработки данных поездок локомотивов с тяжеловесными и длинно-составными поездами показывают, что усреднённые значения продолжительности эпизодов тягового режима для серии 2ЭС6 составляют около 545 с, режима рекуперации — около 109 с. Для серии 2ЭС10 — соответственно 335 с и 216 с. Усреднённые значения электропотребления для каждого эпизода следования в режиме тяги для серии 2ЭС6 — 534 кВт·ч, в режиме рекуперации объём возврата — 107 кВт·ч, для серии 2ЭС10 аналогичные значения 416 кВт·ч и 161 кВт·ч.

Максимальная мощность, возвращаемая в контактную сеть, в режиме рекупе-

рации составляет для серии 2ЭС6 — 7,2 МВт, для 2ЭС10 — 7,1 МВт. Усреднённые значения максимальных уровней тока и напряжения для случаев применения рекуперации для локомотивов 2ЭС6 — 891 А и 3505 В, для 2ЭС10 — 890 А и 3670 В. Средние значения возвращаемой в контактную сеть энергии рекуперации изменяются в диапазоне 73–126 кВт·ч, при этом для серии 2ЭС6 почти в 75 % случаев объём рекуперации доходит до 90 кВт·ч, для серии 2ЭС10 в 60 % — до 100 кВт·ч. В более 85 % наблюдаемых случаев продолжительность эпизодов рекуперации для серии 2ЭС6 составляет до 200 с, для 2ЭС10 в более 70 % — до 400 с.

Наиболее высокого уровня средние значения максимального тока для каждого случая применения рекуперативного торможения достигают на участках с IV типом профиля — до 1030 А. Среднее значение из ряда наблюдаемых максимальных значений напряжений на токоприёмнике в ре-

жиме рекуперативного торможения на участках такого профиля — 3600 В.

ВЫВОДЫ

Результаты обработки данных поездок для локомотивов серий 2ЭС6 и 2ЭС10 на полигонах с различными массами и профилем пути в условиях организации тяжеловесного и длинносоставного движения позволяют определить диапазоны напряжений на накопителе электроэнергии в различных режимах, максимальную и наиболее вероятную нагрузку, продолжительность эпизодов в режимах заряда и разряда.

Оцениваемый режим работы накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения носит кратковременный характер. Ожидаемая средняя продолжительность эпизодов в режиме разряда находится в диапазоне 300–550 с, в режиме заряда — 100–250 с. Усреднённая полезная энергоёмкость накопителя для условий одиночного следования поезда по результатам применения рекуперативного торможения — в диапазоне 100–170 кВт·ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Geng Zhixiu. Datong-Qinhuangdao Railway Heavy Haul Transport Technology. China Railway Publishing House, Beijing, 2009, 539 p.
2. Allen R., Lundgren J., Kaley S. North American Heavy Haul Facts: Fiction and Conventional Wisdom / Proceedings of the INHA STS-Conference, V. 2, Moscow, 1999, pp. 450–455.
3. Darby M. Technology for Profit. Proceedings of 7th INHA Conference, 2001, pp. 3–6.
4. Захаров С. М., Шенфельд К. П. Развитие тяжеловесного движения в мире // Вестник ВНИИЖТ. — 2013. — № 4. — С. 9–18.
5. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при пропуске тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. — 2015. — № 2. — С. 13–17.
6. Kiepe Electric liefert ersten 24-Meter-Elektro-Bus nach Linz. [Электронный ресурс]: <https://www.eb-info.eu/aktuell/aus-den-unternehmen/12-10-2017-kiepe-electric-liefert-ersten-24-meter-elektro-bus-nach-linz/559221/>. Доступ 17.02.2018.
7. Yap, H. T. Hybrid energy/power sources for electric vehicle traction systems / H. T. Yap, N. Schofield, C. M. Bingham // Power Electronics, Machines and Drives, 2004. (PEMD2004). Second International Conference on (Conf. Publ. No. 498, pp. 61–66). DOI: 10.1049/cp:20040260. [Электронный ресурс]: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1348892/>. Доступ 17.02.2018.
8. ÖBB-Hybridlok mit Brennstoffzelle: Versuchslokomotive mit alternativem Antriebskonzept getestet. [Электронный ресурс]: <https://www.eb-info.eu/aktuell/forschung-und-entwicklung/11-10-2017-oebb-hybridlok-mit-brennstoffzelle-versuchslokomotive-mit-alternativem-antriebskonzept-getestet/>. Доступ 17.02.2018.
9. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Никифоров М. М. Выбор мест установки накопителей электрической энергии на полигоне постоянного тока железнодорожного транспорта по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. — 2013. — № 2. — С. 14–18.
10. Черемисин В. Т., Незевак В. Л. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока // Бюллетень результатов научных исследований (Петербургский гос. ун-т путей сообщ.). — 2015. — № 1. — С. 307–314.
11. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — Т. 326. — № 10. — С. 54–64.
12. Чудновец С. П., Харитонов С. А. Накопители электрической энергии для систем генерирования электрической энергии (аналитический обзор) // Научный вестник НГТУ. — 2013. — № 1. — С. 163–172.
13. Незевак В. Л. Основные подходы к использованию накопителей электроэнергии в сетях Smart Grid системы тягового электроснабжения // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2015» — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015. — С. 103–104.
14. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Куцый А. П. Мультиагентный подход к управлению режимами систем электроснабжения железных дорог // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 4. — С. 108–126.
15. Незевак В. Л. Влияние уставок режимов работы накопителя электроэнергии на посту секционирования на эффективность его работы // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции. — Омск: ОмГУПС, 2016. — С. 138–144.
16. Жунисбеков С., Джонсон А., Шевцов А. О некоторых облаках точек хи-квадрат критерия Пирсона // Theoretical & Applied Science. Тараз: Теоретическая и прикладная наука. — 2013. — № 8. — С. 1–23.
17. Корчагин В. А., Игнатенко В. И., Сысов Д. К. Применение негауссовских статистических моделей в задачах технической эксплуатации автомобилей // Вестник СибАДИ. — 2017. — № 3. — С. 68–74.
18. Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Постовалов С. Н. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах: I. Проверка простых гипотез // Сибирский журнал промышленной математики. — 2008. — Том 11. — № 2. — С. 96–111.

Координаты авторов: Незевак В. Л. — NezevakWL@mail.ru, Шатохин А. П. — Shatohin_ap@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 18.12.2017, актуализирована 17.02.2018, принята к публикации 19.02.2018.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 17–20–01148 офи_м_РЖД/17.

