



10. BERU – Pressure sensor glow plug (PSG) Datchiki davleniya [ERU - Pressure sensor glow plug (PSG) Pressure sensors]. Access mode: <http://beru.federalmogul.com/ru>.
11. Simson A.E. et al. Teplovoznye dvigateli vnutrennego sgoraniya: uchebnik dlya vuzov [Diesel internal combustion engines: a textbook for universities]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Transport Publ., 1987, 536 p.
12. Veksler M.S. Sistemy diagnostiki podvizhnogo sostava [Systems for diagnostics of rolling stock]. Part 1. Chelyabinsk : ChIRT Publ., 2005, 116 p.
13. Shvalov D.V., Shapovalov V.V. Sistemy diagnostiki podvizhnogo sostava: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [Diagnostic systems for rolling stock: a textbook for universities of railway transport]. In Shvalov D.V. (ed.). Moscow: Marshrut Publ., 2005, 268 p.
14. Konyshcheva L.K., Nazarov D.M. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv: uchebnoe posobie [Fundamentals of the theory of fuzzy sets: a study guide]. St.-Petersburg : Piter Publ., 2011, 192 p.
15. Kofman A. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Transl. from French. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982, 432 p.
16. Repin V.V., Eliferov V.G. Protsessnyi podkhod k upravleniyu [The process approach to management]. *Modelirovanie biznes-protsessov [Business Process Modeling]*. Moscow: RIA «Standarty i kachestvo» Publ., 2008, 408 p.
17. Shewhart W.A. Statistical method from the view-point of quality control. Washington, The Graduate School, the Department of Agriculture, 1939, p. 155.
18. Ishikava K. Chto takoe vseobshchee upravlenie kachestvom? Yaponskii put' [What is universal quality management? Japanese way]. Moscow: TKB Intersertifika Publ., 1998.

Информация об авторах

Authors

Давыдов Юрий Анатольевич – д. т. н., профессор, кафедра «Локомотивы», ректор, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: puch@festu.khv.ru

Пляскин Артем Константинович – к. т. н., доцент, кафедра «Локомотивы», заведующий кафедрой, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: loc@festu.khv.ru

Кушнирук Алексей Сергеевич – аспирант, кафедра «Локомотивы», ассистент, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, e-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

Davydov Yurii Anatol'evich – Doctor of Engineering Science, Professor, the Subdepartment of Locomotives, Rector, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: puch@festu.khv.ru

Plyaskin Artem Konstantinovich – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Locomotives, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: loc@festu.khv.ru

Kushniruk Aleksei Sergeevich – Ph.D. student, Asst. of the Subdepartment of Locomotives, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: alexey.kushniruk@mail.ru

Для цитирования

For citation

Давыдов Ю. А. Контроль фактического технического состояния локомотивов на основе диагностики / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 59, № 3. – С. 38–47. – DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).38-47.

Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Kushniruk A. S. Controlling actual technical conditions of locomotives on the basis of diagnostics. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 38-74. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).38-47.

УДК 621.311

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).47-57

В. Л. Незевак

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация
Дата поступления: 15 октября 2018

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ШИНАХ ПОСТА СЕКЦИОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОПУСКА ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются вопросы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока в условиях пропуска тяжеловесных поездов. В качестве мест размещения накопителей электрической энергии выбраны посты секционирования. В работе использован метод имитационного моделирования взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения на примере одного из участков Транссиба в условиях организации движения тяжеловесных поездов. В результате моделирования получены суточные графики изменения напряжения и нагрузки накопителей, выполнена обработка данных. Показано влияние накопителей электроэнергии на основные энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения. Получены частотные распределения для объемов электроэнергии, продолжительности эпизодов работы накопителя, оценки энергоемкости в режимах заряда и разряда, выполнена оценка энергоемкости и продолжительности работы накопителя электроэнергии при работе на посту секционирования.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, пост секционирования, накопитель электроэнергии, тяговая нагрузка, напряжение на шинах, объем электроэнергии, продолжительность эпизода работы, частотное распределение, энергоемкость.



V. L. Nezevak

Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation

Received: October 15, 2018

MODELING OF OPERATING MODES OF THE ELECTRIC POWER STORAGE DEVICE WITH THE BUSBARS OF A SECTIONING POINT IN THE CONDITIONS OF HANDLING HEAVY TRAINS

Abstract. This paper deals with use of electric power storages in the traction DC power supply system in conditions of handling heavy trains. Sectioning points were chosen as the location of the electric power storage. The method of simulation modeling of the interaction of the electric rolling stock and the traction power supply system was used in the work using the example of one of the sections of the Transsib in conditions of organizing the movement of heavy trains. As a result of the simulation, diurnal graphs of voltage and load voltage changes were obtained, and data processing was performed. The article shows the influence of electric power storages on the main energy indicators of the traction power supply system. Frequency distributions for volumes of electric power, duration of work episodes of the power storage, an estimation of power capacity in charge and discharge modes are obtained. The power capacity and work duration of the electric power storage while operating at a sectioning point is executed.

Keywords: traction power supply system, sectioning point, electric power storage, traction load, busbar voltage, volume of electric power, duration of the work episode, frequency distribution, energy intensity.

Поиск путей повышения эффективности работы электроэнергетических и транспортных систем привел к успешным разработкам в сфере систем накопления электроэнергии и гибридного привода. В настоящее время во всем мире в транспортной отрасли выполняются исследования и организован выпуск различных образцов систем накопления [1–5]. Проводятся исследования в данном направлении и учеными отечественных транспортных вузов [6–10].

Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса является одной из важнейших задач, стоящих перед холдингом «РЖД», в том числе в условиях организации движения тяжеловесных поездов. Целью разработки систем накопления для систем тягового электроснабжения является повышение пропускной способности участков и энергетической эффективности перевозок в условиях организации тяжеловесного движения.

Эффективность применения накопителей электроэнергии на постах секционирования (ПС) достигается за счет повышения уровня напряжения на шинах ПС, сокращения уровня электропотребления путем улучшения условий применения рекуперации, снижения коэффициента нагрузки тяговых подстанций и др. Ожидаемые от применения накопителя электроэнергии эффекты определяются условиями и режимами его работы. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость оценки энергетических показателей работы накопителя в системе тягового электроснабжения в условиях организации тяжеловесного движения, сопровождающегося пиковыми нагрузками [11, 12].

Организация движения с тяжеловесными и длинносоставными поездами обуславливает рост нагрузок тяговых подстанций (ТП). Расчет нагрузки ТП позволяет оценить интегральные показатели работы системы тягового электроснабжения (средние токи и напряжения, объемы электропотребления, удельный расход за рассматриваемый период и др.). Помимо указанных интегральных показателей представляет интерес анализ суточного графика нагрузки и напряжения ТП и ПС. Указанная задача может быть решена на основе результатов расчета мгновенных схем системы тягового электроснабжения, позволяющего получить графики тяговой нагрузки и напряжения. Анализ полученных результатов позволяет определить в дальнейшем основные энергетические показатели накопителя электроэнергии.

Оценку основных энергетических показателей работы накопителей электроэнергии получим на примере одного из участков Транссиба с горным профилем (тип III) [13]. Имитационное моделирование проводится для условий реализации случайного графика движения поездов. Среднесуточные размеры в грузовом движении для указанного участка составляют около 50 пар. В качестве базового графика принимается случайный график движения поездов, для которого в нечетном направлении движения реализовано 52 поезда, а в четном – 55 поездов. Тяговые расчеты в грузовом движении выполнены для поездов следующих масс (с учетом масс локомотивов): 4200, 9300, 12000 т (табл. 1). Результаты тяговых расчетов получены для участка протяженностью 181,9 км в программном комплексе КОРТЭС, используемом



в холдинге «РЖД» для электрических расчетов системы тягового электроснабжения.

Имитационное моделирование позволяет провести математическую обработку результатов [14] и на основе мгновенных расчетов решить следующие задачи.

1. Оценить изменение напряжения на ПС в течение суток – минимальное, максимальное, среднее значение и частотное распределение по диапазонам:

$$U_{\min}, U_{\max}, U_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}; \quad (1)$$

$$p_1(U_1), p_2(U_2), \dots, p_n(U_n),$$

где U – напряжения (минимальное, максимальное, среднее);

n – количество измерений;

p_i – i -я плотность вероятности по i -му диапазону.

Т а б л и ц а 1

Результаты тяговых расчетов

Направление	Категория	Локомотив	Масса, т	Время, мин		Расход, кВт·ч	Рекуперация, кВт·ч
				полное	под током		
неч	пассажирский	ЭП2К	1065	118,5	57,3	3726,3	–
четн	пассажирский	ЭП2К	1065	119,4	50,2	3069,2	–
неч	пригородный	ЭД4м	629	116,0	55,0	2209	159,0
четн	пригородный	ЭД4м	629	117,0	46,3	1827,9	147,6
неч	грузовой	2ЭС6	4200	151,0	90,8	8956,2	1646,8
четн	грузовой	2ЭС6	4200	150,5	82,3	6824,4	2124,2
неч	грузовой	2ЭС10	12300	168,0	118,3	24031,4	1820,5–
четн	грузовой	2ЭС10	12300	175,3	108,5	17396,4	2695,6
неч	грузовой	2ЭС10	9300	156,7	99,7	19228,8	1724,1
четн	грузовой	2ЭС10	9300	155,3	85,5	14218,9	2503,7

Для тяговой нагрузки оценка выполняется аналогично напряжению.

2. Оценить изменение возврата и передачи энергии на ПС с накопителями электроэнергии, частотное распределение объема энергии по диапазонам:

$$W_{\text{возв}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{возв}}} W_{\text{возв}i}, W_{\text{пер}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{пер}}} W_{\text{пер}j}, \quad (2)$$

$$p_1(W_{\text{возв}(\text{пер})1}), p_2(W_{\text{возв}(\text{пер})2}), \dots, p_n(W_{\text{возв}(\text{пер})n}),$$

где $W_{\text{возв}(\text{пер})}$ – объем возвращенной на шины ПС и переданной в контактную сеть электроэнергии соответственно;

$N_{\text{возв}}, N_{\text{пер}}$ – количество эпизодов возврата и передачи энергии на ПС соответственно.

Под эпизодом возврата и приема энергии здесь понимаются случаи непрерывной передачи энергии по направлениям из контактной сети на шины ПС и с шин ПС в контактную сеть соответственно. Направление потока энергии определяется по направлению тока. Целью оценки объемов электропотребления энергии по эпизодам является определение емкости накопителя электроэнергии, требуемой для работы в режиме заряда и

разряда. Специфика тяговой нагрузки и учет эпизодичности работы в том или ином режиме позволяют на основе статистической обработки определить требуемую емкость накопителя электроэнергии и условия его работы в режиме заряда и разряда.

На рис. 1 представлен фрагмент графика изменения суммарной тяговой нагрузки подстанции. На указанном графике интервалы времени t_1 и t_3 соответствуют продолжительности эпизодов передачи энергии в контактную сеть, а интервал времени t_2 – продолжительности эпизода возврата энергии из контактной сети на шины ТП. Смена направления тока является признаком окончания соответствующего эпизода, при этом интервал отсутствия тяговой нагрузки исключается из рассмотрения. Эпизоды работы рассматриваются как непрерывные, если смены направления тока не происходит. При перемене направления или нахождении накопителя в режиме ожидания, когда ток равен нулю, осуществляется переход к следующему эпизоду работы в соответствующем режиме.

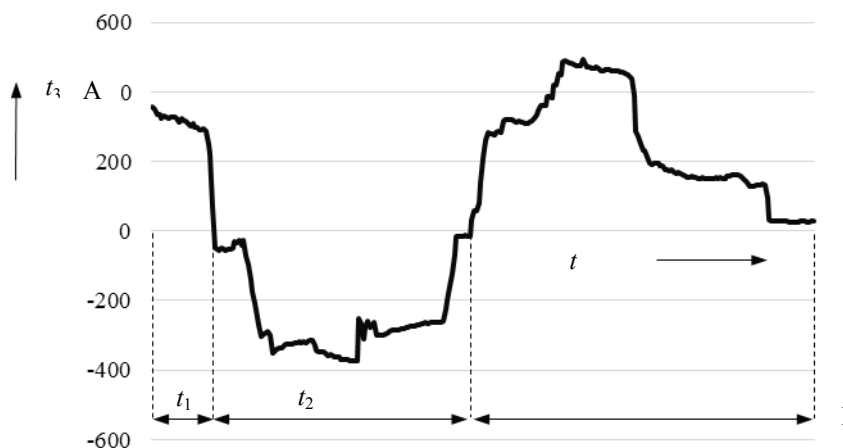


Рис. 1. График тяговой нагрузки ТП

3. Оценить продолжительность эпизодов протекания энергии в различных режимах (передачи и возврата энергии – соответственно t_1 , t_3 и t_2) и распределение по диапазонам:

$$t_{возв} = \sum_{i=1}^{N_{возв}} t_{i\text{возв}}, t_{пр} = \sum_{i=1}^{N_{пр}} t_{i\text{пр}}, \quad (3)$$

$$P_{i\text{возв}}(t_{i\text{возв}}), P_{i\text{пр}}(t_{i\text{пр}}).$$

Условиями для имитационного моделирования с целью оценки влияния работы накопителя электроэнергии на ПС на режимы тяговой нагрузки и основные энергетические показатели системы тягового электроснабжения приняты следующие:

среднесуточные размеры в грузовом движении – 50 пар поездов; унифицированная масса состава – 4000 т, масса тяжеловесных поездов – 9000 т и 12000 т; система тягового электроснабжения участка постоянного тока; тип контактной подвески главных путей – 2МФ100+М120+А185; преобразовательные агрегаты – двенадцатипульсовые последовательного типа. Схема размещения накопителей электроэнергии на двух ПС в системе тягового электроснабжения рассматриваемого участка представлена на рис. 2.

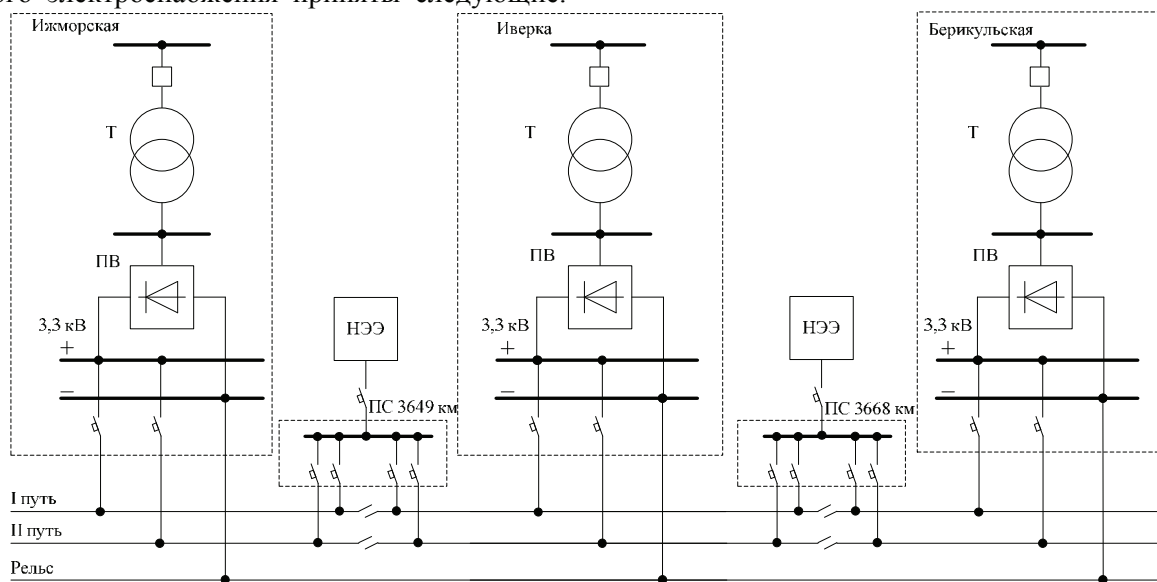


Рис. 2. Схема рассматриваемого участка системы тягового электроснабжения с накопителем электроэнергии

С целью реализации полного подобия [15] модель накопителя электроэнергии заменена моделью выпрямительно-инверторного преобразователя, модель которого подобна модели накопителя электроэнергии и позволяет оценить объемы энергии, протекающие в обоих направлениях, по эпи-

зодам работы. Для моделирования принята жесткая внешняя характеристика преобразователя. Условием для перехода накопителей электроэнергии из режима покоя в режим разряда и заряда было принято достижение уровня напряжения на шинах ПС соответственно ниже 3200 В и выше



3600 В. Размах значений уставок перехода в режим заряда и разряда оказывает существенное влияние на энергоемкость накопителя в системе тягового электроснабжения [16, 17] и системах электроснабжения различных транспортных систем [18–20]. Аналогичные расчеты по подобным схемам замещения показывают адекватность подобия работы выпрямительно-инверторного преобразователя и накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения [21, 22].

Расчет по мгновенным схемам позволяет получить суточный график нагрузки и напряжения в точках присоединений системы тягового электроснабжения с шагом в 1 мин.

Суточные графики изменения напряжения и тяговой нагрузки накопителя электроэнергии на ПС 3649 км и ПС 3668 км участка приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

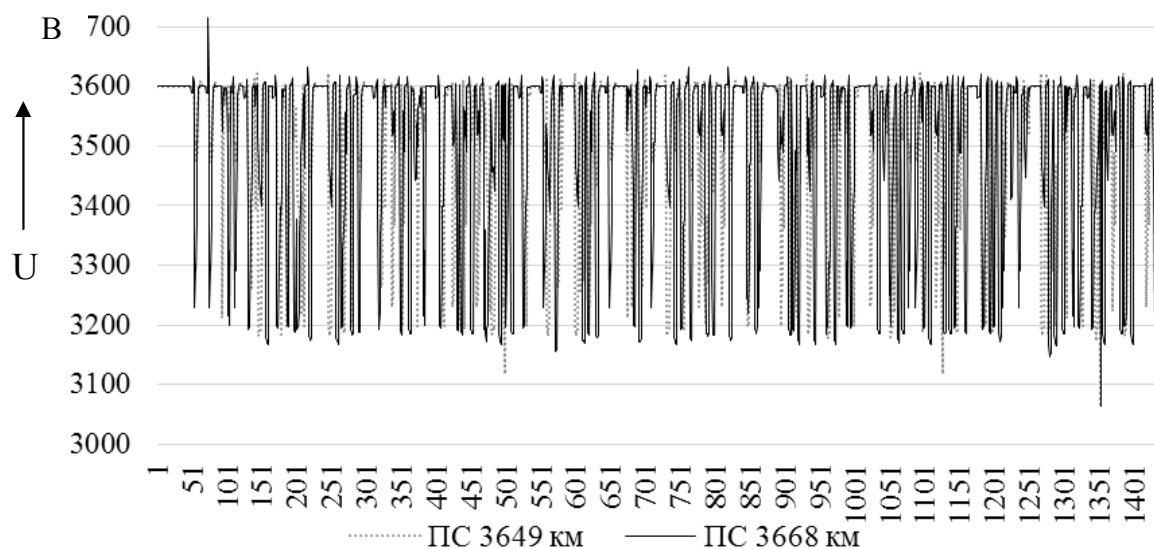


Рис. 3. График напряжения на шинах ПС 3649 км и ПС 3668 км с накопителями электроэнергии

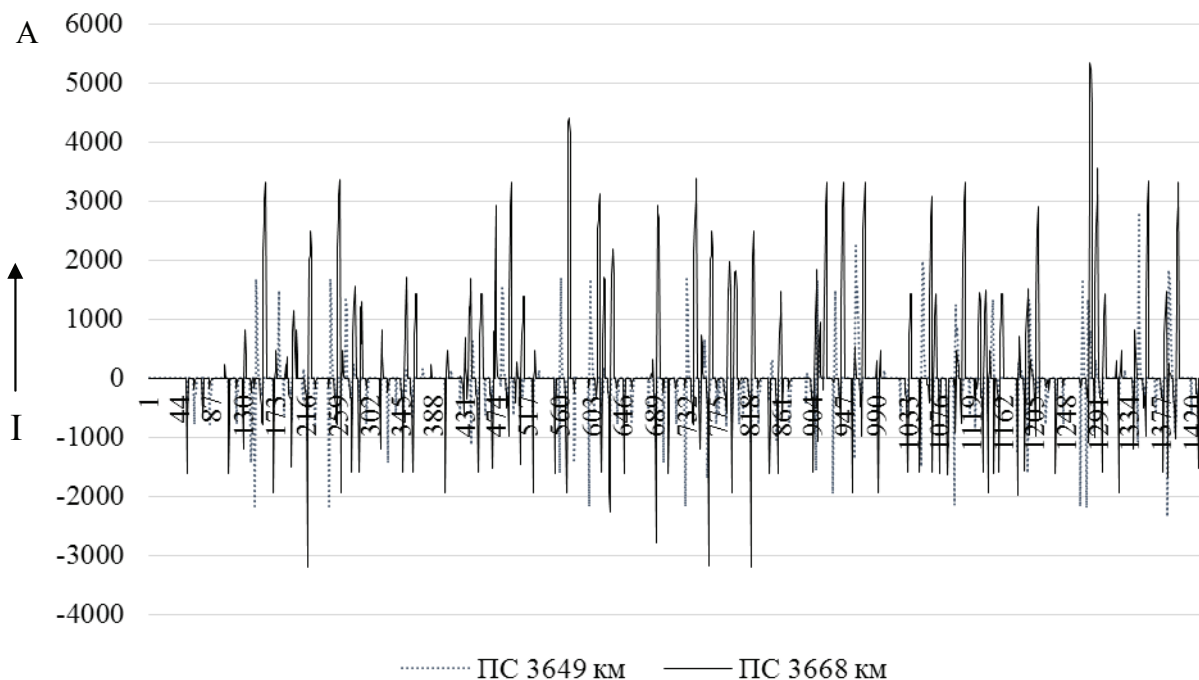


Рис. 4. График тяговой нагрузки накопителей электроэнергии на ПС 3649 км и ПС 3668 км



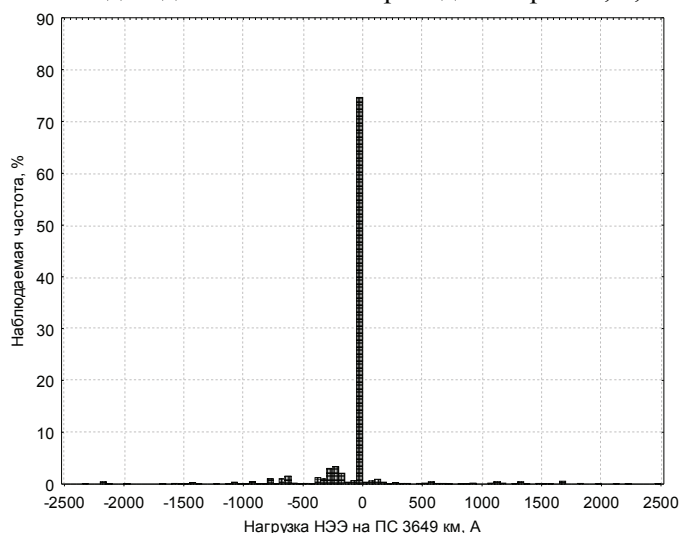
Распределения значений тяговой нагрузки накопителя электроэнергии на ПС 3649 км и ПС 3668 км приведены на рис. 5, *а* и *б* соответственно. Наибольшая частота наблюдений тока накопителя электроэнергии для ПС 3649 км и ПС 3668 км отмечается в режиме заряда в диапазоне значений $-100-0$ А. Графики распределения значений напряжения на шинах ПС 3649 км и ПС 3668 км представлены на рис. 6, *а* и *б* соответственно. Наибольшая частота наблюдений напряжения на шинах ПС на уровне 50 % фиксируется в диапазоне 3500–3600 В.

Рассмотрим отдельно эпизоды работы накопителя электроэнергии на ПС в обоих режимах – передачи энергии в контактную сеть (режим разряда) и возврата энергии из контактной сети (режим заряда). Объем энергии для режима разряда по эпизодам для ПС 3649 км приведен на рис. 7, *а*,

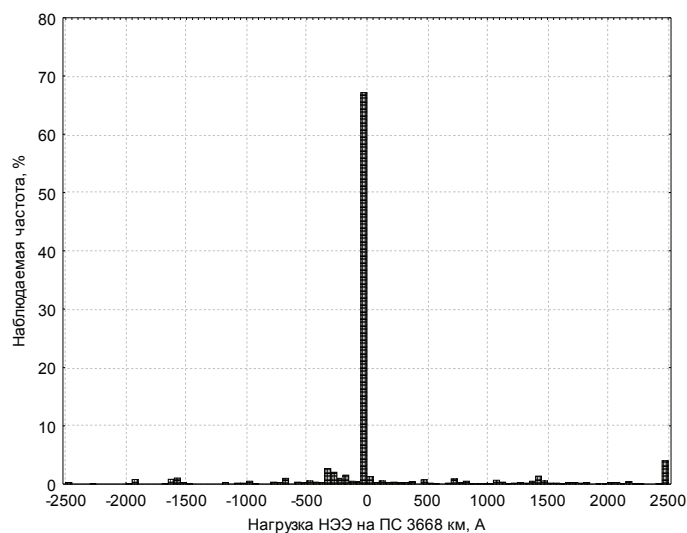
ниже на рис. 7, *б* представлен график распределения эпизодов по их продолжительности в рассматриваемом режиме.

В режиме разряда наибольшая частота наблюдений (50 %) объема энергии за эпизод приходится на диапазон 0–50 кВт·ч, продолжительность эпизодов (частота наблюдений – 40 %) – на диапазон 0–1 мин. В режиме разряда накопителя электроэнергии на ПС 3649 км объем энергии по эпизодам находится в диапазоне 0–450 кВт·ч. Объем энергии в режиме разряда в 90 % случаев не превышает 200 кВт·ч.

Объем энергии для режима заряда приведен на рис. 8, *а*, ниже на рис. 8, *б* представлен график частот наблюдений продолжительности эпизодов работы в режиме заряда для условий работы накопителя электроэнергии на ПС 3649 км.

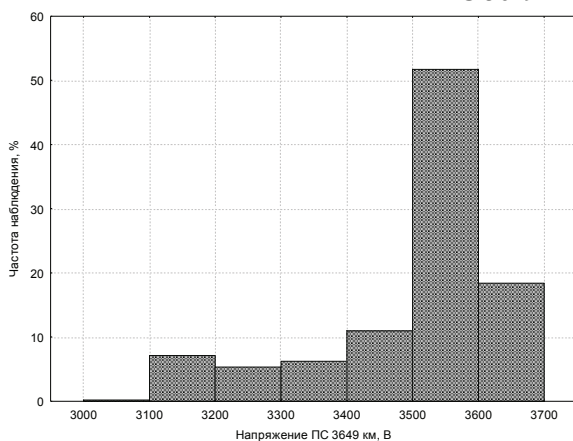


а)

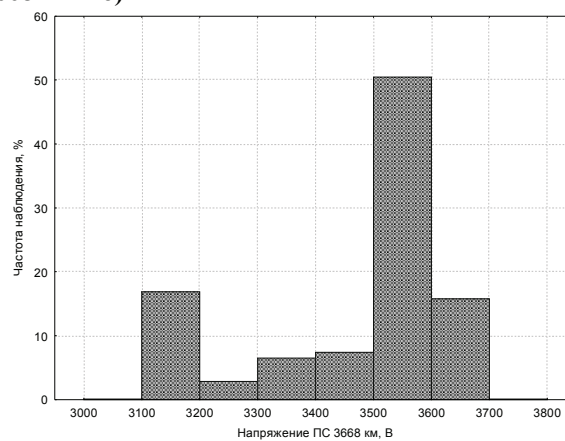


б)

Рис. 5. Частотная гистограмма распределения тяговой нагрузки ПС 3649 км – а), ПС 3668 км – б)



а)



б)

Рис. 6. Частотная гистограмма распределения напряжения на шинах ПС 3649 км – а), ПС 3668 км – б)

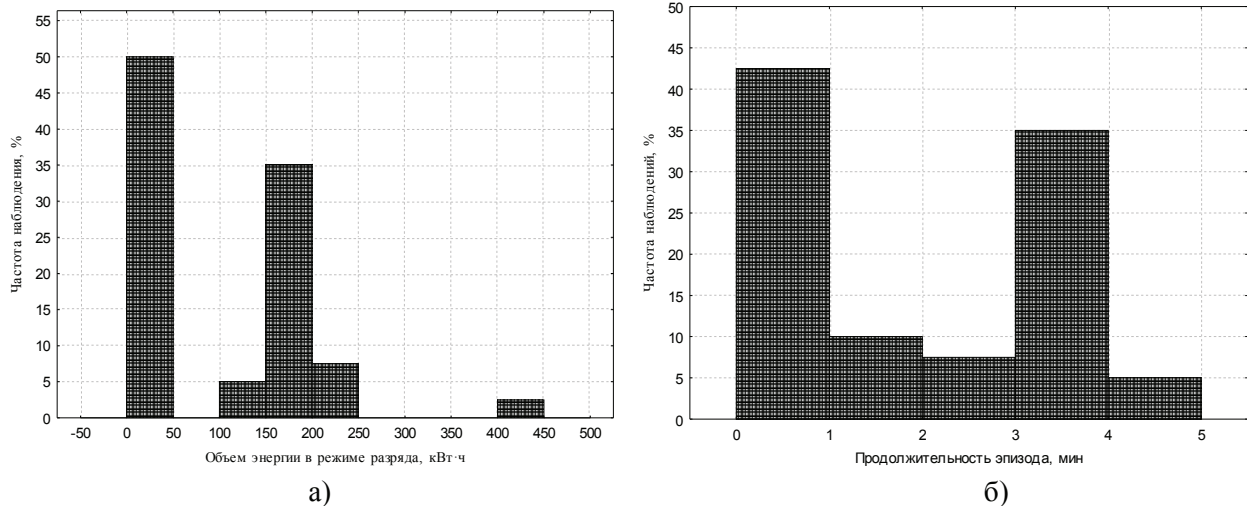


Рис. 7. Частотные гистограммы для режима разряда накопителя электроэнергии на ПС 3649 км для объемов электроэнергии – а) и продолжительности эпизодов – б)

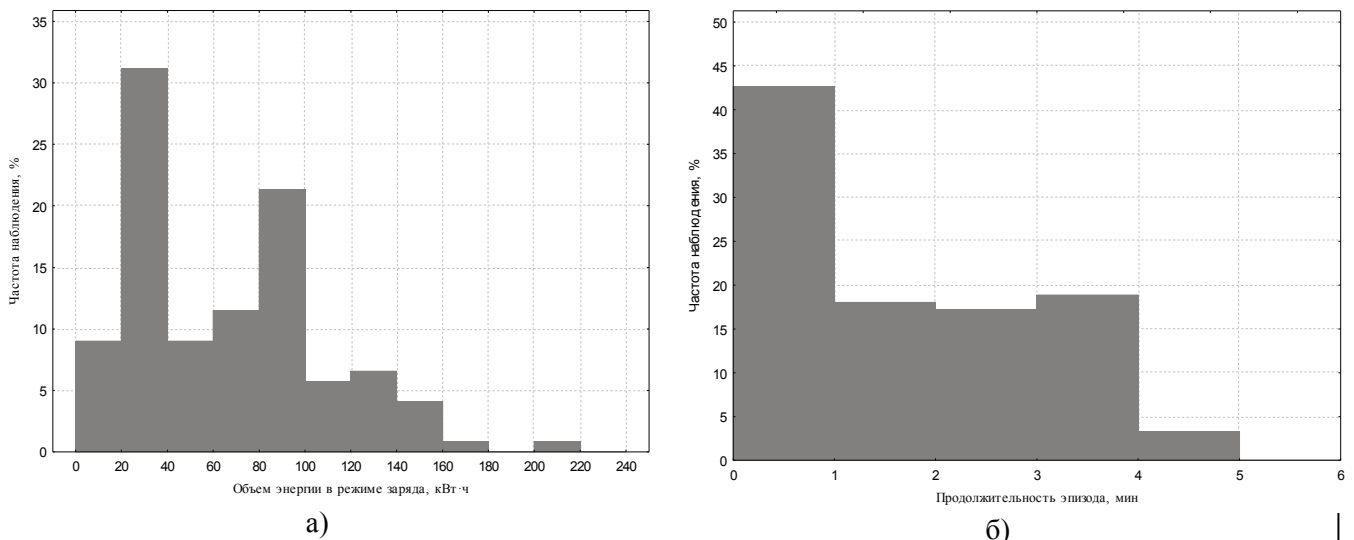


Рис. 8. Частотные гистограммы распределения объема энергии для режима заряда накопителя электроэнергии на ПС 3649 км – а), продолжительности эпизодов работы – б)

Более чем в 90 % случаев продолжительность эпизодов работы в режиме разряда не превышает 4 мин. Продолжительность эпизодов находится в диапазоне 0–5 мин, при этом наиболее наблюдаемыми диапазонами являются 0–1 мин и 3–4 мин с частотой наблюдений 42 % и 35 % соответственно.

В режиме заряда объем энергии по эпизодам работы накопителя электроэнергии находится в диапазоне 0–220 кВт·ч, при этом объем энергии до 160 кВт·ч наблюдается в 95 % случаев. Наиболее наблюдаемый диапазон значений объема энергии по эпизодам – 20–40 кВт·ч с частотой наблюдений свыше 30 %, для диапазона 0–40 кВт·ч частота наблюдений составляет 40 %.

Продолжительность случаев работы накопителя на ПС 3649 км в режиме заряда находится в

диапазоне 0–5 мин. Наиболее наблюдаемый диапазон – 0–1 мин, частота наблюдений для которого составляет свыше 40 %. Для количества свыше 95 % случаев наблюдается продолжительность эпизодов не более 4 мин.

Аналогичные энергетические характеристики получены при обработке результатов имитационного моделирования для работы накопителя на ПС 3668 км (рис. 2). Результаты оценки объема энергии для различных режимов работы при работе накопителей электроэнергии на шинах ПС представлены в табл. 2. Результаты оценки продолжительности эпизодов работы накопителя электроэнергии на шинах ПС в режиме заряда и разряда представлены в табл. 3.



Таблица 2

Результаты оценки энергоемкости накопителя электроэнергии

Объем энергии эпизода	ПС 3649 км	ПС 3668 км
режим заряда накопителя	95 % – до 160 кВт·ч 40 % – до 40 кВт·ч	95 % – до 180 кВт·ч 30 % – до 20 кВт·ч
режим разряда накопителя	90 % – до 200 кВт·ч 50 % – до 50 кВт·ч	95 % – до 600 кВт·ч 40 % – до 100 кВт·ч

Таблица 3

Результаты оценки продолжительности эпизодов работы

Продолжительность эпизода работы	ПС 3649 км	ПС 3668 км
режим заряда накопителя	95 % – до 4 мин 40 % – до 1 мин	95 % – до 4 мин 30 % – до 1 мин
режим разряда накопителя	90 % – до 4 мин 40 % – до 1 мин	100 % – до 4 мин 15 % – до 1 мин

По результатам расчетов для условий применения накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения при организации движения с тяжеловесными и длиннооставными поездами можно сделать следующие выводы:

- наибольшая частота наблюдений значений тока накопителя зафиксирована в режиме заряда в диапазоне от 0 до 100 А;

- частота наблюдений значений напряжения на шинах ПС выше уровня 3600 В для ПС зафиксирована на уровне 15–20 %, а в диапазоне значений ниже 3200 В – на уровне 10–15 %. Частота наблюдений уровня напряжения в течение суток позволяет оценить суммарное время работы и коэффициент использования накопителя. В рассматриваемом случае коэффициент использования достигает значения 0,35, что превышает соответствующее значение – до 0,10 – для пунктов преобразования напряжения на ПС [23];

- частота наблюдений объема энергии в режиме заряда по эпизодам работы в диапазоне 0–180 кВт·ч составляет 95 %, для режима разряда по эпизодам в диапазоне 0–600 кВт·ч – 90 % случаев;

- продолжительность эпизодов работы в режиме заряда в диапазоне 0–4 мин наблюдается в 95 % случаев, для режима разряда в диапазоне 0–4 мин – в 90 % случаев. В обоих режимах продолжительность эпизодов работы накопителей не превышает 5 мин;

- применение накопителей на ПС рассмотренного участка позволяет снизить средний ток

выпрямителей подстанций на 4–13 %, повысить минимальное трехминутное напряжение на токоприемнике ЭПС на 7–11 %, снизить коэффициенты нагрузки силового оборудования ТП на 10–20 %, сократить межпоездной интервал на 25 % (с 19 мин до 15 мин);

- для рассмотренного случая объем энергии для режимов заряда и разряда соотносится как 1/3. В связи с этим для баланса объемов энергии необходимо рассматривать работу накопителя электроэнергии в режиме заряда с изменяющейся уставкой по напряжению, позволяющей обеспечить заряд в режиме малых нагрузок смежных ТП. Сравнение объемов энергии для условий организации движения с поездами унифицированных масс и поездами повышенной массы и длины [24] показывает, что в условиях тяжеловесного и длиннооставного движения возрастают наиболее наблюдаемые объемы энергии для режима заряда с уровня 80–100 кВт·ч до уровня 160–180 кВт·ч, для режима разряда – с уровня 70–95 кВт·ч до уровня 200–600 кВт·ч;

- результаты моделирования позволяют подойти к решению вопросов методологии выбора мест размещения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и обоснованию их номинальных параметров.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных инициатив по гранту № 17-20-01148 офи_м_РЖД/17.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yingyun S. Scheduling of Battery-Based Energy Storage Transportation System With the Penetration of Wind Power / Yingyun S., Jianliang Z., Zuyi L. other // IEEE Transactions on Sustainable Energy. Volume: 8, Issue: 1, Jan. 2017. Pp. 135–144. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2586025.
2. Jinghui W. Electric train energy consumption modeling / Jinghui W., Hesham A. // Applied Energy. Volume 193, 1 May 2017, Pages 346–355. DOI.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.058.
3. 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 18.12.2017.



4. ÖBB-Hybridlokomotive mit Brennstoffzelle: Versuchslokomotive mit alternativem Antriebskonzept getestet. [Электронный ресурс]: <https://www.eb-info.eu/aktuell/forschung-und-entwicklung/11-10-2017-oebb-hybridlokomotive-mit-brennstoffzelle-versuchslokomotive-mit-alternativem-antriebskonzept-getestet/>. Доступ 18.12.2017.
5. 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. (PEMD 2004). Second International Conference on (Conf. Publ. No. 498).
6. Титова Т.С. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии / Т.С. Титова, А.М. Евстафьев // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2017. Т. 14. – № 2. – С. 200–210.
7. Гречишников В.А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене / В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин // *Мир транспорта*. – 2013. Т. 11. – № 5 (49). – С. 54–58.
8. Черемисин В.Т. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока / В.Л. Незевак, В.Т. Черемисин // *Бюллетень результатов научных исследований*. – 2015. – № 1 (14). – С. 76–83.
9. Петрушин Д.А. Расчет режимов работы системы тягового электроснабжения с инерционным накопителем энергии / Д.А. Петрушин // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2011. – № 1 (41). – С. 79–84.
10. Крюков А.В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии / А.В. Крюков, В.П. Закаряков, А.В. Черепанов // *Труды Братского государственного университета*. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 1. – С. 113–120.
11. Istomin S. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn / S. Istomin, V. Nezevak // *Elektrische Bahnen*. – München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH. – 2015. № 4. – P. 186–189.
12. Черемисин В.Т. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения / В.Т. Черемисин, А.Л. Каштанов, В.Л. Незевак // *Известия Транссиба*. – 2017. – № 1 (29). – С. 83–90.
13. Черемисин В.Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов / В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, А.Е. Перестенко // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2017. – № 2. – С. 118–128.
14. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука. – 1971. – 192 с.
15. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов по спец. «Кибернетика электр. систем» / В.А. Веников, Г.В. Веников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
16. Незевак В.Л. Влияние уставок режимов работы накопителя электроэнергии на посту секционирования на эффективность его работы / В.Л. Незевак // *Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции*. Омский государственный университет путей сообщения. – 2016. – С. 138–144.
17. Незевак В.Л. К вопросу об управлении режимом работы накопителя электрической энергии в системе тягового электроснабжения / В.Л. Незевак // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. – 2013. – С. 55–62.
18. Teymourfar R. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line / R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, R. Nejati // *Energy Conversion and Management*. Vol. 56, April 2012, Pp. 206–214. Doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.019.
19. ZongYu Gao, JianJun Fang, YiNong Zhang, Lan Jiang, Di Sun, Wenrong Guo. Control of urban rail transit equipped with ground-based supercapacitor for energy saving and reduction of power peak demand // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 67, 2015, Pages 439–447. Doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.019.
20. Amedeo Frilli, Enrico Meli, Daniele Nocciolini, Luca Pugi, Andrea Rindi / *Energetic optimization of regenerative braking for high speed railway systems* // *Energy Conversion and Management*, Vol. 129, 2016, Pages 200–215, doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.011.
21. Черемисин В.Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В.Л. Незевак, В.Т. Черемисин, А.П. Шатохин // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. – 2015. Т. 326. – № 10. – С. 54–64.
22. Вильгельм А.С. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока / В.Л. Незевак, А.С. Вильгельм, А.П. Шатохин // *Наука и образование транспорту*. – 2013. Т. 1. – № 1. – С. 243–247.
23. Черемисин В.Т. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии [Текст] / В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, В.В. Эрбес // *Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения*. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 132–143.
24. Незевак В.Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии / В.Л. Незевак // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2017. – № 4 (68). – С. 159–170.

REFERENCES

1. Yingyun S., Jianliang Z., Zuyi L. et al. Scheduling of Battery-Based Energy Storage Transportation System With the Penetration of Wind Power. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Volume: 8, Issue: 1, Jan. 2017, pp. 135–144. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2586025.
2. Jinghui W., Hesham A. Electric train energy consumption modeling. *Applied Energy*. Volume 193, 1 May 2017, pp. 346–355. DOI.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.058.
3. Kiepe Electric liefert ersten 24-Meter-Elektro-Bus nach Linz. [Elektronnyi resurs]: <https://www.eb-info.eu/aktuell/aus-den-unternehmen/12-10-2017-kiepe-electric-liefert-ersten-24-meter-elektro-bus-nach-linz/559221/>. Access date is 18.12.2017.
4. ÖBB-Hybridlokomotive mit Brennstoffzelle: Versuchslokomotive mit alternativem Antriebskonzept getestet. [Electronic resource]: <https://www.eb-info.eu/aktuell/forschung-und-entwicklung/11-10-2017-oebb-hybridlokomotive-mit-brennstoffzelle-versuchslokomotive-mit-alternativem-antriebskonzept-getestet/>. Access date is 18.12.2017.



5. Yap H.T., Schofield N., Bingham C.M. Hybrid energy/power sources for electric vehicle traction systems. *Power Electronics, Machines and Drives, 2004. (PEMD 2004). Second International Conference on (Conf. Publ. No. 498)*.
6. Titova T.S. Evstafev A.M. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti lokomotivov s nakopitelyami energii [Increasing the energy efficiency of locomotives with energy storage devices]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 200–210.
7. Grechishnikov V.A., Shevlyugin M.V. Ekspluatatsiya nakopitelya energii na metropolitene [Operation of the energy storage device on the metro]. *Mir transporta [World of Transport]*, 2013, Vol. 11, No. 5 (49), pp. 54–58.
8. Cheremisin V.T. Nezevak V.L. Perspektivy primeneniya nakopitelei elektricheskoi energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Prospects for the application of electric energy storage devices in the system of traction power supply of direct current]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of the results of scientific research]*, 2015, No. 1 (14), pp. 76–83.
9. Petrushin D.A. Raschet rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s inertsionnym nakopitelem energii [Calculation of operating modes of the traction power supply system with inertial energy storage]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State Transport University]*, 2011, No. 1 (41), pp. 79–84.
10. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Cherepanov A.V. Modelirovanie rezhimov sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh nakopitelyami energii [Modeling modes of traction power supply systems equipped with energy storage devices]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki [Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences]*, 2015, Vol. 1, pp. 113–120.
11. Istomin S., Nezevak V. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn. *Elektrische Bahnen*. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2015. No. 4, pp. 186–189.
12. Cheremisin V.T., Kashtanov A.L., Nezevak V.L. Organizatsiya kontrolya predel'nykh rezhimov raboty tyagovoi seti v usloviyakh skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya [Organization of control of the limit operation modes of the traction network in conditions of high-speed and heavy traffic]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2017, No. 1 (29), pp. 83–90.
13. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Perstenko A.E. Kharakteristiki profilei puti na elektrifitsirovannykh uchastkakh zheleznykh dorog v aspekte klassifikatsii tipov [Characteristics of track profiles on electrified sections of railways in terms of types classification]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State Transport University]*, 2017, No. 2, pp. 118–128.
14. Rumshinskii L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta [Mathematical processing of experimental results]. Moscow: Nauka Publ, 1971, 192 p.
15. Venikov V.A., Venikov G.V. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki): uchebnik dlya vuzov po spets. «Kibernetika elektr. sistem» [The theory of similarity and modeling (applied to the problems of the electric power industry): a textbook for universities for spec. "Cybernetics of Electr. Systems"]. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow: Vyssh. shk. Publ, 1984, 439 p.
16. Nezevak V.L. Vliyanie ustavok rezhimov raboty nakopitelya elektroenergii na postu sektionirovaniya na effektivnost' ego raboty [Influence of the settings of the modes of operation of the electric power storage at the partition post on the efficiency of its work]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoi konferentsii [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: proceedings of a scientific conference]*. Omsk state transport university Publ., 2016, pp. 138–144.
17. Nezevak V.L. K voprosu ob upravlenii rezhimom raboty nakopitelya elektricheskoi energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya [To the question of controlling the mode of operation of the electrical energy storage system in the traction power supply system]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]*. 2013, pp. 55–62.
18. Teymourfar R., Asaei B., Iman-Eini H., Nejati R. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. *Energy Conversion and Management*. Vol. 56, April 2012, pp. 206–214. Doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.019.
19. ZongYu Gao, JianJun Fang, YiNong Zhang, Lan Jiang, Di Sun, Wenrong Guo. Control of urban rail transit equipped with ground-based supercapacitor for energy saving and reduction of power peak demand. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 67, 2015, Pages 439–447. Doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.019.
20. Amedeo Frilli, Enrico Meli, Daniele Nocciolini, Luca Pugi, Andrea Rindi. Energetic optimization of regenerative braking for high speed railway systems. *Energy Conversion and Management*, Vol. 129, 2016, Pages 200–215, doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.011.
21. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya v usloviyakh raboty postov sektionirovaniya s nakopitelyami elektricheskoi energii [Increasing the energy efficiency of the traction power supply system in the conditions of the work of sectioning points with electric energy storage devices]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering]*, 2015, Vol. 326, No. 10, pp. 54–64.
22. Vil'gel'm A.S., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Sravnitel'naya effektivnost' variantov ispol'zovaniya energii rekuperatsii na zheleznykh dorogakh postoyannogo toka [Comparative effectiveness of options for the use of energy recovery on DC railways]. *Nauka i obrazovanie transportu [Science and education for transport]*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 243–247.
23. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Erbes V.V. Rezul'taty otsenki rezhimov raboty aktivnykh i passivnykh postov sektionirovaniya v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya s tsel'yu vybora parametrov nakopitelei elektroenergii [The results of the evaluation of the modes of operation of active and passive sectioning points in the traction power supply system in order to select the parameters of electrical energy storage]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*. Omsk state transport un-ty. Omsk, 2017, No. 3 (31), pp. 132–143.
24. Nezevak V.L. Modelirovanie rezhimov nagruzki na shinakh postov sektionirovaniya pri rabote v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya nakopitelei elektroenergii [Modeling of the load conditions on the busbars of sectioning points when operating in the traction power supply system of electric energy storage devices]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State Transport University]*, 2017, No. 4 (68), pp. 159–170.

**Информация об авторах****Authors**

Незевак Владислав Леонидович – к. т. н., старший научный сотрудник, доцент, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация, e-mail: nezevakWL@mail.ru

V. L. Nezevak - Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation, e-mail: nezevakWL@mail.ru

Для цитирования**For citation**

Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов / В. Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 59, № 3. - С. 47–57. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).47-57.

Nezevak V. L. Modeling of operating modes of the electric power storage device with the busbars of a sectioning point in the conditions of handling heavy trains. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 47–57. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).47-57.

УДК 629.421.1

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).57-68

В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 16 октября 2018 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СЕРИИ ЭД9Э В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB SIMULINK

Аннотация. Тяговый трансформатор моторвагонного подвижного состава переменного тока является одним из самых важных элементов тягового привода, от которого зависит протекание электромагнитных процессов в выпрямительно-инверторном преобразователе и тяговых двигателях в режимах тяги и рекуперативного торможения.

В данной статье представлено математическое моделирование тягового трансформатора типа ОДЦЭ-2000/25Б-У1, применяемого на современных электропоездах переменного тока серии ЭД9Э и ЭП3Д. На математической модели тягового трансформатора электропоезда проводятся опыты в режимах холостого хода и короткого замыкания, необходимых для сравнения характеристик математической модели с характеристиками реального тягового трансформатора. Для проведения моделирования вводятся дифференциальные уравнения электромагнитных и переходных процессов тягового трансформатора электропоезда. Для максимального приближения протекающих электромагнитных процессов в математической модели к процессам, протекающим в тяговом трансформаторе электропоездов переменного тока ЭП3Д и ЭД9Э, модель была дополнена магнитными характеристиками сердечника. Достоверность математической модели тягового трансформатора проверялась согласно опыту холостого хода и короткого замыкания. Полученные результаты опытов свидетельствуют о том, что характеристики математической модели соответствуют характеристикам тягового трансформатора электропоездов серии ЭП3Д и ЭД9Э.

Разработанная математическая модель тягового трансформатора позволит получить электромагнитные процессы, близкие к реальным, протекающие в тяговом приводе электропоезда переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Ключевые слова: тяговый трансформатор, выпрямительно-инверторный преобразователь, тяговый электродвигатель (ТЭД), выпрямительная установка возбуждения, короткое замыкание, переменный ток, моделирование, тиристор, холостой ход, электропоезд.

V. S. Ivanov, O. V. Mel'nichenko, V. V. Durnykh

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: October 16, 2018

MATHEMATICAL MODELING OF A TRACTION TRANSFORMER OF AN AC ELECTRIC TRAIN OF THE ED9E SERIES IN A SIMULATION ENVIRONMENT MATLAB SIMULINK

Abstract. Traction transformer of AC multiple unit is one of the most important elements of the traction drive, on which the electromagnetic processes in the rectifier-inverter converter and traction motors depend in the traction and regenerative braking modes.

This article presents mathematical modeling of a traction transformer of type ODTSE-2000 / 25B-U1, used on modern electric trains of alternating current of series ED9E and EP3D. Using the mathematical model of the electric train traction transformer, experiments are conducted in the idle run and short circuit modes necessary for comparing the characteristics of a mathematical model with those of a real traction transformer. To carry out the simulation, differential equations of electromagnetic and transient processes of the electric train traction transformer are introduced. The mathematical model of the transformer is supplemented by the introduction of