

metodov v zadachah rasprostraneniya i rassejaniya voln (obzor)." *Prikladnaja mehanika*. Vol. 32. No. 12. 1996. 3–27. Print. 3. Fil'shtinskij, L. A. "Difrakcija uprugih voln na treshhinah, otverstijah, vkljuchenijah v izotropnoj srede," *Izv. AN SSSR. Mehanika tverdogo tela*. No. 4. 1991. 119–127. Print. 4. Gandel', Yu. V., and V. D. Dushkin. *Matematicheskie modeli dvumernyh zadach difrakcii: singuljarnye integral'nye uravnenija i chislennye metody diskretnyh osobennostej*. Kharkov: Akad. VV MVD Ukrainy, 2012. Print. 5. Nazarenko, A. M. "Difrakcija garmonicheskikh voln na cilindricheskom uprugom vkljuchenii v uslovijah ploskoj deformacii." *Dinamicheskie sistemy*. No. 19. 2005. 54–60. Print. 6. Nazarenko, A. M., B. E. Panchenko and A. M. Lozhkin. "Difrakcija voln ploskoj deformacii na zhestkom cilindricheskom vkljuchenii proizvol'nogo poperechnogo sechenija." *Visnyk Donec'kogo universytetu. Ser. A: Pryrod-nychi nauky*. No. 3. 2006. 113–117. Print. 7. Grinchenko, V. T., and V. V. Meleshko. *Garmonicheskie kolebanija i volny v uprugih telah*. Kyiv: Nauk. dumka, 1981. Print. 8. Panasjuk, V. V., M. P. Savruk and Z. T. Nazarchuk. *Metod singuljarnyh integral'nyh uravnenij v dvumernyh zadachah difrakcii*. Kyiv: Nauk. dumka, 1984. Print. 9. Nazarenko, A. M., B. E. Panchenko and A. M. Lozhkin. "Metod singuljarnyh integral'nyh uravnenij v zadachah difrakcii uprugih voln na cilindricheskikh vkljuchenijah." *Visnyk SumDU. Ser.: Fizyka, matematyka, mehanika*. No. 8. 2004. 144–150. Print.

Надійшла (received) 05.06.2015

УДК 629.423.3

Л.В. ОВЕРЬЯНОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;

О.В. ОМЕЛЬЯНЕНКО, студентка, НТУ «ХПИ»;

И.В. НОВОФАСТОВСКИЙ, студент, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНЕРЦИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

Исследуется работа тягового электропривода электропоезда с бортовым электромеханическим инерционным накопителем энергии. Для расширения диапазона рабочих напряжений тягового электродвигателя и системы электромеханического преобразования энергии накопителя предлагается применить реверсивный повышающе-понижающий DC-DC преобразователь. Приводится схема включения накопителя в тяговый электропривод с DC-DC преобразователем, а также математическая модель обмена энергией в исследуемой системе. Установлено, что предлагаемое схематическое решение позволяет повысить эффективность утилизации энергии торможения электроподвижного состава, которая может быть использована в процессе последующего разгона поезда.

Ключевые слова: тяговый электропривод, электромеханический инерционный накопитель энергии, DC-DC преобразователь, электродвижущая сила, энергия обмена.

Введение. Морально устаревший электроподвижной состав (ЭПС) пригородного сообщения, эксплуатируемый в настоящее время на железных дорогах страны, нуждается в замене. Новый подвижной состав такого назначения должен создаваться на базе перспективных технологий транспортного машиностроения, одной из которых является энергосбережение. Для пригородного подвижного состава, характеризующегося частыми пусками и остановами, на которые расходуется от 30% энергии, затрачиваемой на тягу поездов, утилизация и последующее использование этой энергии является достаточно эффективным энергосберегающим средством. Одним из эффективных путей является использование на подвижном составе накопителей энер-

гии. Проблема состоит в выборе типа накопителя, определении схем и алгоритмов его работы для достижения максимального эффекта экономии электроэнергии, затрачиваемой для тяги поездов.

Цель и постановка задачи. Проведенное ранее исследование работы электрохимического инерционного накопителя энергии в тяговом приводе электропоезда [1] показало, что обмен энергией между тяговым электродвигателем (ТЭД) и накопителем имеет место до тех пор, пока *электродвижущая сила* (ЭДС) машины, работающей в генераторном режиме, не уравновесится противо-ЭДС машины, работающей двигателем. При этом на каждом цикле «торможение – стоянка – разгон» ЭПС экономится до 10% энергии.

Для повышения эффективности работы накопителя, то есть запасаания накопителем большего количества энергии при торможении, а также повышенного использования ранее накопленной энергии при разгоне ЭПС необходимо устройство, позволяющее расширить диапазон рабочих напряжений ТЭД и системы электрохимического преобразования энергии накопителя.

Цель данной статьи – указать один из путей повышения уровня энергии обмена между ТЭД и накопителем за счет схемотехнических решений, обеспечивающих расширение диапазона рабочих напряжений.

Для достижения этой цели необходимо разработать схему и математическую модель работы тягового электропривода электропоезда ЭР2Т с бортовым электрохимическим инерционным накопителем энергии и DC-DC преобразователем.

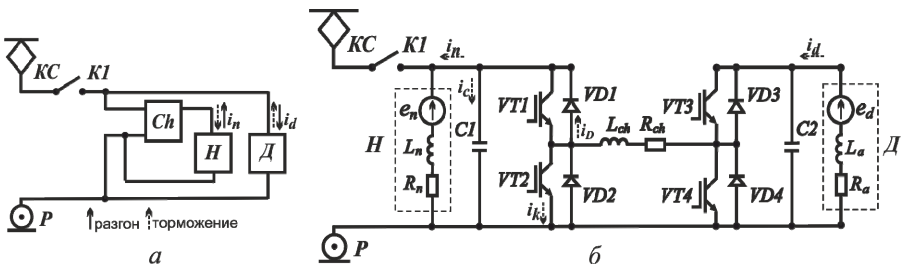


Рис. 1. – Схемы включения накопителя в тяговый привод ЭПС с DC-DC преобразователем; *а* – функциональная; *б* – принципиальная (режим торможения ЭПС) *Д* – эквивалентный тяговый электродвигатель; *Н* – накопитель; *Ch* – DC-DC преобразователь; *KI* – ключ; *KC* – контактная сеть; *P* – рельс; *VT1...VT4* – IGBT-транзисторы; *VD1...VD4* – диоды; *C1, C2* – конденсаторы; L_a, L_n, L_{ch} – индуктивности ТЭД, накопителя и DC-DC преобразователя; R_a, R_n, R_{ch} – активные сопротивления ТЭД, накопителя и DC-DC преобразователя; e_d, e_n – ЭДС ТЭД и накопителя; i_d – ток двигателя; i_n – ток накопителя; i_k – ток через транзистор *VT2*; i_d – ток через диод *VD1*; i_c – ток конденсатора *C1*.

Математическая модель. Одним из способов регулирования напряжений в цепях электрохимического преобразования энергии постоянного тока является применение *импульсных преобразователей* [2]. Для нашего случая целесообразно использование в схеме тягового привода с накопителем *ревер-*

сивного повышающе-понижающего DC-DC преобразователя, который может обеспечить повышающий коэффициент преобразования в 3...4 единицы.

Функциональная и принципиальная схемы включения накопителя в тяговый привод ЭПС с DC-DC преобразователем показаны на рис. 1.

В режиме торможения ЭПС эквивалентный ТЭД (два тяговых двигателя, включенных параллельно) работают в генераторном режиме, а система электромеханического преобразования энергии (СЭМПЭ) накопителя – в режиме двигателя. До тех пор, пока ЭДС СЭМПЭ накопителя не уравновесит противо-ЭДС ТЭД, ток от ТЭД к накопителю протекает через транзистор $VT3$ и диод $VD1$.

Расширить диапазон рабочих напряжений в исследуемой системе и, тем самым, продолжить процессы обмена энергией после того, как ЭДС накопителя уравновесит противо-ЭДС ТЭД, позволит DC-DC преобразователь, работа которого включает две фазы – накопления энергии в дросселе и ее передачи в нагрузку.

В фазе накопления ток от ТЭД протекает через дроссель L_{ch} и запасает в нем энергию. Транзисторы $VT3$ и $VT2$ находятся в проводящем состоянии. Диод $VD1$ при этом блокирует нагрузку и не позволяет конденсатору фильтра разряжаться. Ток в накопителе поддерживается только за счет энергии, запасенной в конденсаторе $C1$.

Когда транзистор $VT2$ закрывается, схема переходит в фазу передачи энергии дросселя L_{ch} в нагрузку – ЭДС самоиндукции дросселя суммируется с напряжением на зажимах ТЭД. В итоге, напряжение на зажимах СЭМПЭ накопителя становится выше напряжения на зажимах ТЭД.

Математическая модель обмена энергией в тяговом приводе с накопителем в режиме торможения ЭПС при работе DC-DC преобразователя в повышающем режиме, имеет вид:

фаза накопления

$$\begin{cases} i_d R_a + L_a \frac{di_d}{dt} + R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} = e_d; & i_D R_D + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0; \\ i_n R_n + L_n \frac{di_n}{dt} - \frac{1}{C} \int i_c dt = -e_n; & i_d - i_k - i_D = 0; \quad i_D - i_c - i_n = 0; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \cdot \frac{e_d i_d}{v_{ps}} - f_w; & \frac{dw_n}{dt} = K_w \cdot i_n, \end{cases} \quad (1)$$

фаза передачи энергии

$$\begin{cases} i_d R_a + L_a \frac{di_d}{dt} + R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} + i_d R_D + \frac{1}{C} \int i_c dt = e_d; \\ i_n R_n + L_n \frac{di_n}{dt} - \frac{1}{C} \int i_c dt = -e_n; & i_d - i_c - i_n = 0; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \cdot \frac{e_d i_d}{v_{ps}} - f_w; & \frac{dw_n}{dt} = K_w \cdot i_n, \end{cases} \quad (2)$$

где R_D – активное сопротивление диода DI в прямом направлении.

Продифференцировав уравнения, содержащие подынтегральные функции, а затем, понизив порядок полученных уравнений, представим системы (1), (2) в следующей форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = \frac{e_d - R_a i_d - R_{ch} i_d}{L_a + L_{ch}}; \quad \frac{di_D}{dt} = -\frac{i_c}{CR_d}; \\ \frac{di_n}{dt} = t_k; \quad \frac{dt_k}{dt} = -\frac{1}{L_n} \left(\frac{de_n}{dt} - \frac{i_c}{C} + t_k R_n \right); \\ i_d - i_k - i_D = 0; \quad i_D - i_c - i_n = 0; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \cdot \frac{e_d i_d}{v_{ps}} - f_w; \quad \frac{dw_n}{dt} = K_w \cdot i_n, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = t_k; \quad \frac{dt_k}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left(\frac{de_d}{dt} - t_k R_d - t_k R_{ch} - t_k R_D - \frac{i_c}{C} \right); \\ \frac{di_n}{dt} = s_k; \quad \frac{ds_k}{dt} = -\frac{1}{L_n} \left(\frac{de_n}{dt} + \frac{i_c}{C} - s_k R_n \right); \quad i_d - i_c - i_n = 0; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \cdot \frac{e_d i_d}{v_{ps}} - f_w; \quad \frac{dw_n}{dt} = K_w \cdot i_n. \end{array} \right. \quad (4)$$

Поскольку частота коммутации рабочего транзистора $VT2$ составляет около 1000 Гц, возникает необходимость решения систем уравнений (3) и (4) с *переменной структурой*. Для проведения численного моделирования процесса обмена энергией в тяговом приводе с бортовым электромеханическим накопителем предлагается решать полученные системы уравнений независимо друг от друга, причем полученные результаты решения системы (3) будут начальными условиями для решения системы (4). И наоборот, результаты решения системы (4) – начальные условия для решения системы (3).

Результаты исследования. Для определения эффективности работы предлагаемой схемы путем численного моделирования нами был исследован режим обмена энергией между тяговыми двигателями и накопителем при торможении электропоезда ЭР2Т [3]. Предполагается, что тяговый двигатель мощностью 235 кВт, напряжением 750 В с максимальными оборотами 1250 об/мин обменивается с накопителем энергией 5,2 МДж, при мощности 280 кВт в интервале частот вращения 16550 ... 50 об/мин. Этот процесс обмена протекает через реверсивный повышающе-понижающий DC-DC преобразователь, содержащий дроссель индуктивностью $5 \cdot 10^{-4}$ Гн и активным сопротивлением 0,0025 Ом.

Изменения оборотов ротора накопителя и скорости ЭПС при перетоке мощности в режиме торможения ЭПС приведены на рис. 2.

При торможении ЭПС до 12 с, когда разница между ЭДС тягового двигателя и противо-ЭДС накопителя является постоянной и ток обмена находится на уровне 750 А, преобразователь работает постоянно в фазе передачи

энергии. Здесь кривые оборотов накопителя и скорости ЭПС совпадают. После 12 с, когда разница ЭДС тягового двигателя и противо-ЭДС накопителя уменьшается, ток обмена падает до нуля, и процесс обмена энергией прекращается. В итоге, обороты накопителя w_n и скорость ЭПС v_{ps} остаются на уровне 1250 с^{-1} и $6,9 \text{ м/с}$, соответственно.

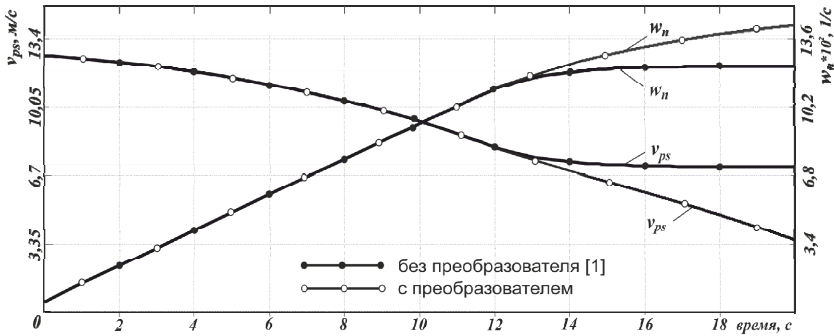


Рис.2 – Режим торможения ЭПС

При переходе работы преобразователя в режим чередования фаз накопления и передачи энергии напряжения на зажимах накопителя превышает противо-ЭДС в его обмотке и после 12 с. Ток изменяется незначительно (в пределах $600 \dots 750 \text{ А}$) и процесс обмена энергией между тяговыми двигателями и накопителем продолжается. В итоге, обороты накопителя w_n возрастают до 1360 с^{-1} и скорость ЭПС v_{ps} снижается до $3,35 \text{ м/с}$.

Таким образом, использование DC-DC преобразователя в системе тягового электропривода с накопителем энергии позволяет расширить диапазон обмена энергией с $2,5 \text{ МДж}$ до $3,38 \text{ МДж}$.

Выводы. Включение в схему тягового электропривода с накопителем энергии реверсивного повышающе-понижающего DC-DC преобразователя расширяет диапазон рабочих напряжений систем электромеханического преобразования тягового двигателя и накопителя при торможении электропоезда. Это позволяет на 25 % повысить эффективность утилизации энергии торможения электроподвижного состава, которая может быть использована в процессе последующего разгона поезда.

Список литературы: 1. Омеляненко В.И., Оверьянова Л.В. Работа бортового электромеханического инерционного накопителя энергии в тяговом приводе пригородного электропоезда // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – № 1. – С. 44 – 49. 2. Rashid M. H. *Power electronics handbook*. – California: Academic Press. – 2007. – 895 p. 3. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. *Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р*. – М.: транспорт. – 1986. – 359 с.

Bibliography (transliterated): 1. Omel'janenko, V. I., and L. V. Over'janova. "Rabota bortovogo elektromekhanicheskogo inercionnogo nakopitelja energii v tjavovom privode prigorodnogo elektropeozda." *Zalізничний транспорт України*. No. 1. 2015. 44–49. Print. 2. Rashid, M. H. *Power electronics handbook*. California: Academic Press, 2007. Print. 3. Cukalo, P. V., and N. G. Eroshkin. *Elektropeozda ER2 i ER2R*. Moscow: transport, 1986. Print.

Поступила (received) 13.05.2015