

В.П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Л.В. ОВЕРЬЯНОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
О.В. ОМЕЛЬЯНЕНКО, студентка, НТУ «ХПИ»

РАБОТА СИСТЕМЫ «ТЯГОВЫЙ ПРИВОД – НАКОПИТЕЛЬ» В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Исследуется работа бортового электромеханического накопителя энергии в составе тягового привода пригородного электропоезда. Создана математическая модель, описывающая протекающие процессы обмена энергией в системе «тяговый привод – накопитель» в режиме торможения электроподвижного состава без учета влияния процессов в контактной сети. Математическая модель позволяет установить связь процесса обмена энергией с параметрами накопителя и тягового электродвигателя, а также дает возможность оценить энергетическую эффективность исследуемой системы. Предлагается оценивать полезный эффект от применения бортового накопителя в системе с помощью коэффициента рекуперации.

Ключевые слова: электроподвижной состав, электромеханический инерционный накопитель энергии, тяговый привод, обмен энергией, энергетическая эффективность.

Введение. В настоящее время с целью повышения энергетической эффективности электропоездов в составе их тягового привода все чаще применяются бортовые накопители энергии. Среди известных типов накопителей (электрохимические, емкостные, электромеханические инерционные, сверхпроводящие) наиболее целесообразно, на наш взгляд, применять электромеханические инерционные накопители, которые отвечают определенным требованиям по массо-габаритным показателям, сроку службы и условиям эксплуатации на подвижном составе.

Электромеханический инерционный накопитель энергии представляет собой сочетание маховика и обращенной машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым коммутатором [1]. Совмещенную конструкцию маховика и электрической машины будем именовать системой электромеханического преобразования энергии (СЭМПЭ).

При торможении электроподвижного состава (ЭПС) энергия замедления его массы преобразуется накопителем в кинетическую энергию вращения маховика, а при разгоне кинетическая энергия маховика накопителя передается в систему тягового привода, нагрузкой которого будет масса подвижного состава. Когда СЭМПЭ работает в режиме двигателя, накопитель запасает энергию, и частота вращения ротора увеличивается. Накопитель отдает энергию, когда СЭМПЭ переходит в режим генератора и частота вращения ротора снижается. Уровень запасенной накопителем энергии зависит от момента инерции маховика и частоты его вращения. А уровень мощности определяется параметрами СЭМПЭ, а также системой управления – как коммутатором СЭМПЭ, так и общей системой управления накопителем.

Работа бортового накопителя энергии возможна как совместно с контакт-

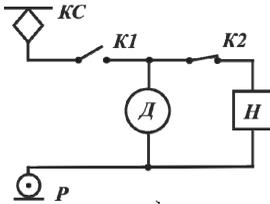


Рис. 1 – Структурная схема тягового привода с накопителем: КС – контактная сеть; Р – рельс; К1, К2 – ключи; Д – тяговый двигатель; Н – накопитель.

ной сетью (рис. 1, ключ К1 – замкнут), так и автономно (рис. 1, ключ К1 – разомкнут). Поскольку анализ работы накопителя энергии совместно с контактной сетью на начальных этапах исследования представляется нам довольно громоздкой и трудоемкой задачей, в данной статье ограничимся рассмотрением процесса обмена энергией в тяговом приводе между тяговыми электродвигателями (ТЭД) и накопителем энергии в режиме торможения ЭПС без учета влияний процессов, протекающих в контактной сети.

Постановка задачи. Разработать математическую модель для исследования процессов обмена энергией в тяговом приводе с накопителем в

режиме торможения ЭПС при отсутствии питания от контактной сети.

Установить связь процесса обмена энергией с параметрами накопителя и тягового электродвигателя, что, в конечном итоге, даст возможность оценить уровень энергетической эффективности предлагаемого накопителя при его функционировании в системе «тяговый привод – накопитель».

Для исследования процессов обмена энергией выбираем электропоезд постоянного тока пригородного сообщения, базовая секция которого состоит из головного и моторного вагонов. Технические характеристики поезда приняты на уровне параметров ЭР2Т [2]. Электропоезд оснащен тяговыми двигателями 1ДТ-003 с мощностью 235 кВт, номинальным напряжением 750 В и током 345 А.

Величина энергии, которая высвобождается при остановочном электродинамическом торможении базовой секции электропоезда ЭР2Т от скорости 45 км/ч до 0 км/ч на горизонтальном участке пути, соответствует энергии обмена накопителя. В расчёте на два тяговых двигателя она составляет 5,2 МДж. При этом СЭМПЭ накопителя должна обеспечивать возврат и прием электрической энергии при напряжении 700 В и номинальном токе 400 А.

Математическая модель. На основании уравнений электрического равновесия и уравнений движения математическое описание процессов, протекающих в тяговом приводе с двумя тяговыми двигателями 1ДТ-003 и накопителем в режиме торможения ЭПС, имеет вид:

$$\left\{ \frac{di_d}{dt} = \frac{e_d - e_n - i_d(R_a + R_n)}{L_a + L_n}, \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \cdot \frac{e_d i_d}{v_{ps}} - f_w; \frac{d\omega_n}{dt} = K_\omega \cdot i_d, \right. \quad (1)$$

где $K_v = C_{md} \pi \eta_{ted} \eta_r / C_{ed} 30 m_{ps}$, $K_\omega = C_{mn} B_{sr} \eta_n / J$ – электрофизические коэффициенты; i_d – ток; e_d – электродвижущая сила (ЭДС) ТЭД; e_n – ЭДС накопителя; R_a , L_a – активное сопротивление и индуктивность ТЭД; R_n , L_n – активное сопротивление и индуктивность накопителя; v_{ps} – скорость ЭПС;

f_w – удельная сила сопротивления движению; ω_n – частота вращения ротора накопителя; C_{ed} , C_{md} – машинные постоянные ТЭД; C_{en} , C_{mn} – геометрическая машинная постоянная накопителя; m_{ps} – масса секции электроподвеса, приходящаяся на два тяговых двигателя; B_{sr} – среднее значение индукции; J – момент инерции маховика; η_{ied} , η_r , η_n – коэффициенты полезного действия ТЭД, тягового привода, накопителя, соответственно.

В связи с тем, что электрическая машина накопителя имеет постоянное возбуждения ($B_{sr} = const$), то ее ЭДС пропорциональна частоте вращения ротора накопителя и определяется как $e_n = C_{en} B_{sr} \omega_n$, где C_{en} – электрическая машинная постоянная накопителя.

Что касается функции ЭДС тягового двигателя, работающего в генераторном режиме с независимым возбуждением,

$$e_d = f_e(v_{ps}, i_v), \quad (2)$$

то она задается в соответствии с экспериментальными данными (рис. 2) в виде одномерных массивов чисел Vps и Iv размера 1×24 , а также двумерного массива Ed размером 24×24 .

Для вычисления произвольного значения ЭДС двигателя e_d в произвольной точке (v_{ps}, i_v) применим интерполяцию функции на основании *дробно-факторного эксперимента* 2^{3-1} [3] по четырем точкам (Vps_i, Iv_j) , (Vps_{i+1}, Iv_j) , (Vps_i, Iv_{j+1}) , (Vps_{i+1}, Iv_{j+1}) на плоскости $VpsOlv$, взятых из заданных массивов и окружающих произвольную точку (v_{ps}, i_v) :

$$Vps_i \leq v_{ps} < Vps_{i+1}, \quad Iv_j \leq i_v < Iv_{j+1}.$$

По массиву Edg определим соответствующие значения функции:

$$z_1 = e_g(Vps_i, Iv_j) = Ed_{ij}, \quad z_2 = e_g(Vps_{i+1}, Iv_j) = Ed_{i+1,j}, \\ z_3 = e_g(Vps_i, Iv_{j+1}) = Ed_{i,j+1}, \quad z_4 = e_g(Vps_{i+1}, Iv_{j+1}) = Ed_{i+1,j+1}.$$

Вычислим коэффициенты уравнения регрессии

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2$$

для кодированных факторов:

$$a_0 = \frac{1}{4}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4), \quad a_1 = \frac{1}{4}(-z_1 + z_2 - z_3 + z_4), \\ a_2 = \frac{1}{4}(-z_1 - z_2 + z_3 + z_4), \quad a_3 = \frac{1}{4}(z_1 - z_2 - z_3 + z_4).$$

Подставляя в уравнение регрессии значения кодированных факторов

$$x_1 = \frac{v_{ps} - Vps_{cp}}{Vps_{cp} - Vps_i}, \quad x_2 = \frac{i_v - Iv_{cp}}{Iv_{cp} - Iv_j},$$

где $Vps_{cp} = (Vps_i + Vps_{i+1})/2$, $Iv_{cp} = (Iv_j + Iv_{j+1})/2$, получим значение функции ЭДС двигателя в генераторном режиме (2).

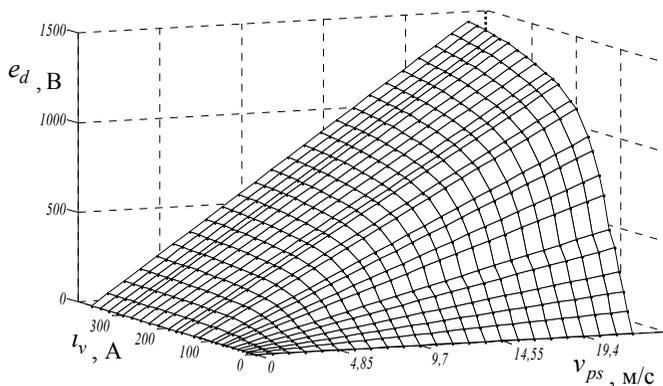


Рис. 2 – Зависимость ЭДС ТЭД e_d от скорости ЭПС v_{ps} и тока возбуждения i_v .

Начальные условия и постоянные величины для цифрового моделирования процессов обмена энергией в системе «тяговый привод – накопитель» в режиме торможения ЭПС приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Начальные условия и постоянные величины для СДУ (1)

Начальные условия		Постоянные величины		Постоянные величины	
i_d , А	875	R_a , Ом	0,14	C_{en}	0,182
v_{ps} , м/с	12,5	L_a , Гн	$1,52 \cdot 10^{-3}$	C_{mn}	1,75
ω_n , 1/с	52,4	C_{md}	102	J , кг·м ²	3,5
i_v , А	25	C_{ed}	10,7	B_{sr} , Тл	3,5
e_d , В	147,3	η_r	0,9	η_n	0,95
e_n , В	17,9	R_n , Ом	0,005	η_{ted}	0,905
f_w , Н/кг	0,0129	L_n , Гн	$3,05 \cdot 10^{-5}$	m_{ps} , т	117

Результаты цифрового моделирования. Полученная система дифференциальных уравнений (1) была решена встроенными методами интегрирования системы MATLAB с помощью решателя ode23t, в основу которого положен *неявный метод трапеций*.

Результаты цифровых расчетов основных показателей, характеризующих работу системы «тяговый привод – накопитель» в режиме торможения электропоезда, приведены на рис. 3.

Полученные зависимости носят вполне объяснимый характер с позиций физической сущности протекания процессов в рассматриваемой системе.

Установлено, что при движении поезда в режиме торможения его скорость снижается за 12 с от значения 12,5 м/с до 7,5 м/с, а частота вращения накопителя возрастает от 52 с⁻¹ до 1240 с⁻¹, и далее эти показатели меняются не существенно. При этом ток по истечении 12 с резко снижается.

Что касается энергетических составляющих обменных процессов, то в

начальный момент торможения ЭПС обладал энергией 5,46 МДж, а в конечный – 1,85 МДж. При этом накопитель начал запасать энергию со значения 4,8 кДж, что соответствует энергии «мертвого объема», и на 20 с его энергия достигла значения 2,5 МДж.

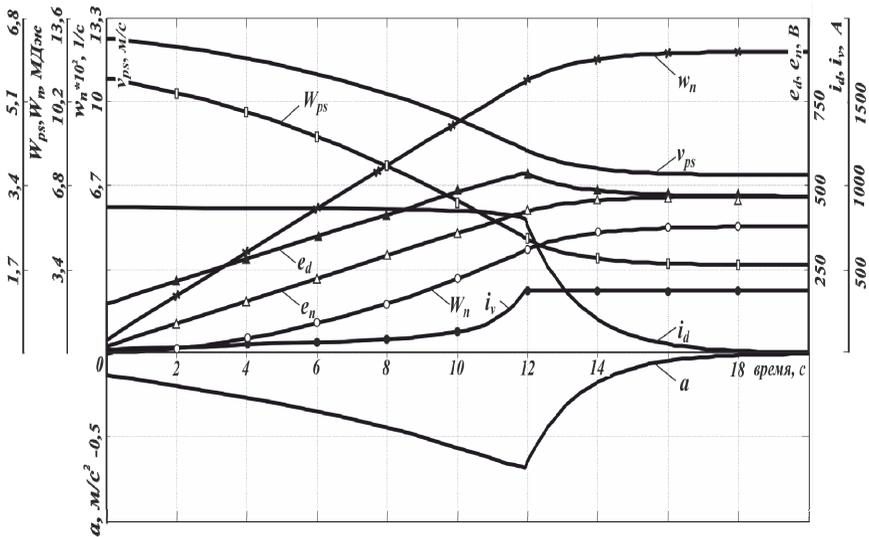


Рис. 3 – Процессы обмена энергией в системе «тяговый привод – накопитель» в режиме торможения электропоезда:

a – ускорение ЭПС; W_{ps} , W_n – кинетические энергии движения ЭПС и вращения ротора накопителя, соответственно.

Эффективность исследуемого процесса обмена энергией может быть оценена с помощью коэффициента рекуперации $K_R = W_{n1} / W_{ps1}$, где W_{n1} / W_{ps1} – отношение энергии, запасенной накопителем, к энергии, выделяющейся при торможении поезда.

В данном случае коэффициент рекуперации составил 0,46.

Перспектива дальнейших исследований. Как видно из рис. 3, процессы обмена замедляются после 12 секунды, что связано со встречно изменяющимся значением частот вращения ТЭД и ротора накопителя, а также их ЭДС. На 20 секунде процессы обмена энергией прекращаются, поскольку напряжения ТЭД и накопителя уравнились, и ток в цепи равен нулю.

Для поддержания номинального значения тока в цепи и продолжения процессов обмена энергией необходимо устройство, которое могло бы обеспечить переток мощности в прежнем направлении при текущих значениях скорости ЭПС и частоты вращения накопителя. Для этого в дальнейших исследованиях в системе тягового привода ЭПС с накопителем предлагается применить полупроводниковый повышающе-понижающий DC-DC преобразователь [4], обеспечивающий необходимую разность напряжений на зажи-

мах ТЭД и накопителя. Предполагается существенное повышение коэффициента рекуперации.

Выводы. Таким образом, в данной статье разработана математическая модель работы системы «тяговый привод – накопитель» в режиме торможения ЭПС. Эта модель позволяет определить закономерности протекания процессов обмена энергией, а также установить связь этих процессов с параметрами накопителя и тягового двигателя.

Эффективность использования накопителя на борту ЭПС оценивается с помощью коэффициента рекуперации, который в данном случае составил 0,46. Этот показатель может быть существенно повышены за счет применения в системе «тяговый привод – накопитель» полупроводникового повышающе-понижающего DC-DC преобразователя.

Список литературы: 1. *Омельяненко В.И., Рябов Е.С., Оверьянова Л.В.* Инерционный накопитель энергии – перспективная технология энергосбережения для электроподвижного состава // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2013. – № 1(65). – С. 38 – 54. 2. *Цукало П.В., Ерошкин Н.Г.* Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. – М.: Транспорт. – 1986. – 359 с. 3. *Плаксин Ю.М.* Математические методы планирования эксперимента. – ДеЛи. – 2007. – 296 с. 4. *Li H., Peng F.Z.* A new ZVS bi-directional dc-dc converter for fuel cell and battery application // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – vol.19, no.1. – P. 54 – 65.

Bibliography (transliterated): 1. *Omelj'janenko, V. I., E. S. Rjabov and L. V. Over'janova.* "Inercionnyj napokitel' energii – perspektivnaja tehnologija energosberezhenija dlja elektropodvizhnogo sostava." *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostozenia.* No. 1 (65). 2013. 38–54. Print. 2. *Cukalo, P. V., and N. G. Eroshkin.* *Elektropoezda ER2 i ER2R.* Moscow: Transport. 1986. Print. 3. *Plaksin, Ju. M.* *Matematicheskie metody planirovanija eksperimenta.* DeLi, 2007. Print. 4. *Li, H., and F. Z. Peng.* "A new ZVS bi-directional dc-dc converter for fuel cell and battery application." *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 19. No. 1. 2004. 54–65. Print.

Надійшла (received) 09.10.2014

УДК 629.429.3:621.313

С.Ю. ЧЕРВ'ЯКОВ, аспірант, НТУ «ХПІ»;

Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ ВАГОНА ЗІ ЗМІННИМ КУТОМ НАХИЛУ ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ

На поточний момент при розробці нових електрорухомих складів та при моделюванні їх руху виникає питання щодо збільшення середньої швидкості руху та доцільності використання вагонів зі змінним кутом нахилу. В роботі розглядається застосування нахилимих вагонів для зменшення поперечного прискорення, що зазнає кузов вагона при проходженні кривої. Встановлено, що застосування подібних механізмів дозволяє значно підвищити допустиму швидкість прохо-

© С. Ю. Черв'яков, Б. Г. Любарський, 2014