

В. И. ОМЕЛЬЯНЕНКО, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»
Л. В. ОВЕРЬЯНОВА, ассистент НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ МЕЖДУ НАКОПИТЕЛЕМ И ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ПРИГОРОДНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассматривается математическая модель режимов обмена энергией между инерционным накопителем и тяговым приводом электродвижущего состава, а также проводится цифровое моделирование режимов работы системы.

Ключевые слова: тяговый привод, электродвижущий состав, цифровое моделирование, инерционный накопитель.

Введение. Рекуперативное торможение электродвижущего состава (ЭПС) является одним из эффективных средств энергосбережения. Однако, процесс рекуперации мощности, если не принять специальных мер, имеет предел из-за ограничения по напряжению или току. Устранение этой проблемы может быть обеспечено использованием в тяговом приводе ЭПС накопителей энергии [1].

Из существующих схем включения наиболее эффективной является схема параллельного включения, позволяющая рационально распределять поток мощности на привод и хранение.

Целью настоящей статьи является демонстрация математической модели обмена энергией между инерционным накопителем и тяговым приводом, которая связывает показатели этой энергии с геометрическими и электромагнитными параметрами электромеханического преобразователя энергии этого накопителя.

Математическая модель. Рассматриваемая схема приведена на рис.1. Здесь процесс рекуперации может продолжаться теоретически до нуля.

Эта схема может работать в двух режимах – автономном (ключ K разомкнут), и параллельно контактной сети, когда ключ K замкнут. Второй режим требует довольно сложной системы управления, которая предотвратит нежелательный отток энергии от накопителя к контактной сети в режиме рекуперации, а также нежелательный приток энергии от контактной сети в режиме тяги.

Очевидно, что при автономном режиме управление проще. Но, несмотря на это, он все-таки представляет несомненный интерес, так как позволяет достаточно прозрачно установить закономерности влияния параметров накопителя на процесс обмена энергией между тяговым приводом и накопителем.

Приведенная схема работает в двух режимах. В режиме рекуперативного торможения тяговый двигатель D выдает энергию торможения в накопитель. В режиме тяги (разгон ЭПС) накопитель выдает

энергию на тяговый электродвигатель (ТЭД). Соответственно математические модели этих процессов будут выглядеть следующим образом.

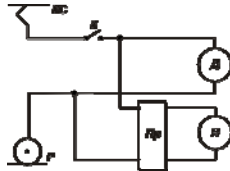


Рис.1 – Блок-схема тягового привода с накопителем энергии:

КС – контактная сеть, Р – релей, Д – тяговый электродвигатель постоянного тока, H – инерционный электрохимический накопитель энергии, Pr – двунаправленный DC-DC прерыватель, К – разъединитель.

Режим рекуперативного торможения (запасание накопителем энергии):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{dg}}{dt} = \frac{e_{dg} - \frac{e_{nd}}{\beta} - i_{dg} \left(R_a + \frac{R_n}{\beta^2} \right)}{L_a + \frac{L_n}{\beta^2}}; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \frac{e_{dg} i_{dg}}{v_{ps}} + \frac{F_s}{m_{ps}}; \quad \frac{dw_{nd}}{dt} = K_\omega \cdot \frac{e_{nd} i_{dg}}{\beta w_{nd}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Режим тяги (выдача накопителем энергии):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{dg}}{dt} = \frac{e_{nd} k \beta - e_{dg} - i_{dg} (R_a + R_v + R_n \beta^2)}{L_a + L_v + L_n \beta^2}; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = K_v \frac{e_{dg} i_{dg}}{v_{ps}} - \frac{F_s}{m_{ps}}; \quad \frac{dw_{nd}}{dt} = -K_\omega \frac{e_{nd} i_{dg} k \beta}{w_{nd}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) приняты следующие обозначения: i_{dg} – ток в цепи ТЭД – накопитель; e_{dg} , e_{nd} – ЭДС ТЭД и накопителя, соответственно; v_{ps} , w_{nd} – скорость ЭПС и частота вращения ротора накопителя, соответственно; R_a , R_n – активное сопротивление якорной обмотки ТЭД и накопителя, соответственно; L_a , L_n – индуктивность якорной обмотки ТЭД и накопителя, соответственно; R_v , L_v – активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения ТЭД, соответственно; β , k – коэффициент регулирования прерывателя и ЭДС накопителя, соответственно; $\frac{F_s}{m_{ps}}$ – удельная сила сопротивления движению ЭПС; коэффициенты K_v и K_ω , которые определяются согласно выражениям $K_v = \frac{C_{md} \pi \eta_p}{C_{ed} 30 m_{ps}}$, $K_\omega = \frac{C_{mn} \pi \eta_n}{C_{en} 30 J}$, где C_{md} , C_{ed} и C_{mn} , C_{en} – машинные постоянные ТЭД и электрической машины

накопителя; η_p, η_n – К.П.Д. передачи тягового привода ЭПС и накопителя, соответственно; J – момент инерции ротора накопителя; m_{ps} – масса ЭПС.

Результаты цифрового моделирования тестовой задачи. Работа математической модели была проверена нами при решении тестовой задачи для следующих параметров накопителя (табл.) в условиях его обмена энергии с тяговым двигателем 1ДТ.003 электропоезда ЭР2Р [2]. Для аккумулярования и последующей выдачи энергии принимаем накопитель с энергией обмена 6,32 МДж, который способен воспринимать электроэнергию средним током 400 А при напряжении 700 В.

Таблица – Параметры накопителя для тестовой задачи

Параметр	Значение
Активное сопротивление накопителя R_n , Ом	0,005
Индуктивность накопителя L_n , Гн	$3,05 \cdot 10^{-5}$
Геометрическая постоянная накопителя C_{en}	0,204
Геометрическая постоянная накопителя C_{mn}	1,95
Момент инерции накопителя J , кг·м ²	3,5
К.П.Д. накопителя η_n , о.е.	0,95

Результаты цифрового моделирования для торможения и разгона ЭПС приведены на рис. 2.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что показатели обмена энергией не противоречат физическим закономерностям протекания этих процессов. Существенное влияние на процессы накопления и выдачи энергии оказывают коэффициент регулирования прерывателя β и коэффициент регулирования ЭДС накопителя k . Для оценки степени влияния этих показателей, как и других электромагнитных и геометрических параметров накопителя, необходимо определиться с критерием оценки процессов обмена энергией между накопителем и системой тягового привода ЭПС. В качестве такого критерия предлагается коэффициент эффективности процессов обмена:

$$K_{\text{э}} = K_p K_u,$$

где K_p – коэффициент рекуперации, который показывает долю запасенной накопителем энергии в кинетической энергии торможения ЭПС, а K_u – коэффициент использования, который показывает долю обменной энергии накопителя в полной энергии, затраченной на разгон ЭПС до заданной скорости.

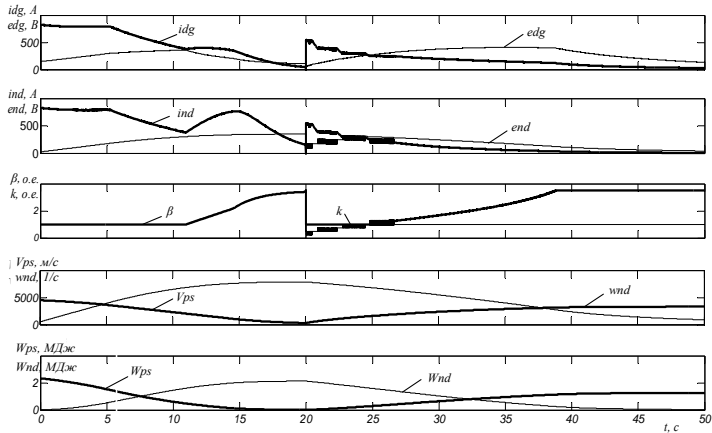


Рис. 2 – Результаты цифрового моделирования:

W_{ps} , W_{nd} – кинетическая энергия ЭПС и накопителя, соответственно

Выводы. Получена математическая модель процессов электро-механического преобразования энергии в режимах торможения и разгона ЭПС, которая связывает геометрические и электромагнитные параметры накопителя с показателями эффективности процессов обмена энергией.

В качестве критерия оценки процессов обмена энергией между накопителем и системой тягового привода ЭПС предлагается коэффициент эффективности процессов обмена, который представляет собой произведение коэффициента рекуперации и коэффициента использования обменной энергии накопителя.

Список литературы: 1. Омеляненко В. И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения / В. И. Омеляненко, Г. В. Омеляненко. // Техническая электродинамика. – 2002. - №4. - С.83-88. 2. Филиппов О. К. Об эффективности рекуперативного торможения на электропоездах ЭР2Р, ЭР2Т / О. К. Филиппов, Б. И. Хомяков, А. Ю. Белокрылин, С. И. Меркушин, О. Н. Назаров // Локомотив - 1993. - №6 -С.18-19.

Поступила в редколлегию 30.04.2013

УДК 625.282:625.032.07

Математическая модель режимов обмена энергией между накопителем и тяговым приводом пригородного электроподвижного состава / В. И. Омеляненко, Л. В. Оверьянова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 31 (1004). – С. 101–104. – Бібліогр.: 2 назв.

Розглядається математична модель режимів обміну енергією між інерційним накопичувачем та тяговим приводом електрорухомого складу, а також проводиться цифрове моделювання режимів роботи системи.

Ключові слова: тяговий привід, електрорухомий склад, цифрове моделювання, інерційний накопичувач.

The mathematical model of the mode of energy exchange between inertial storage device and traction drive electric rolling stock is considered and simulation modes of the system is performed.

Keywords: traction drive, electric rolling stock, simulation, inertial storage device.