

**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, электроподвижной состав, цифровое моделирование, инерционный накопитель.

**Введение.** Рекуперативное торможение электроподвижного 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.

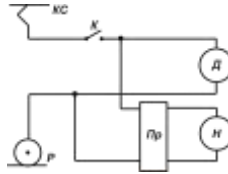


Рис.1 – Блок-схема тягового привода с накопителем энергии: КС – контактная сеть, Р – рельс, Д – тяговый электродвигатель постоянного тока, H – инерционный электромеханический накопитель энергии, Пр – двунаправленный DC-DC прерыватель, K – разъединитель.

Режим рекуперативного торможения (запасание накопителем энергии):

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

Режим тяги (выдача накопителем энергии):

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

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;  $\beta$ ,  $k$  – коэффициент регулирования прерывателя и ЭДС накопителя, соответственно;  $F_s / m_{ps}$  – удельная сила

сопротивления движению ЭПС; коэффициенты  $K_v$  и  $K_\omega$ , которые определяются согласно выражениям  $K_v = \frac{C_{md}\pi\eta_p}{C_{ed}30m_{ps}}$ ,  $K_\omega = \frac{C_{mn}\pi\eta_n}{C_{en}30J}$ , где

$C_{md}$ ,  $C_{ed}$  и  $C_{mn}$ ,  $C_{en}$  – машинные постоянные ТЭД и электрической машины накопителя;  $\eta_p, \eta_n$  – 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 аккумуляирования 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 <sup>2</sup> | 3,5                  |
| К.П.Д. накопителя $\eta_n$ , 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  $\beta$  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:

$$K_\varepsilon = K_p K_u,$$

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.

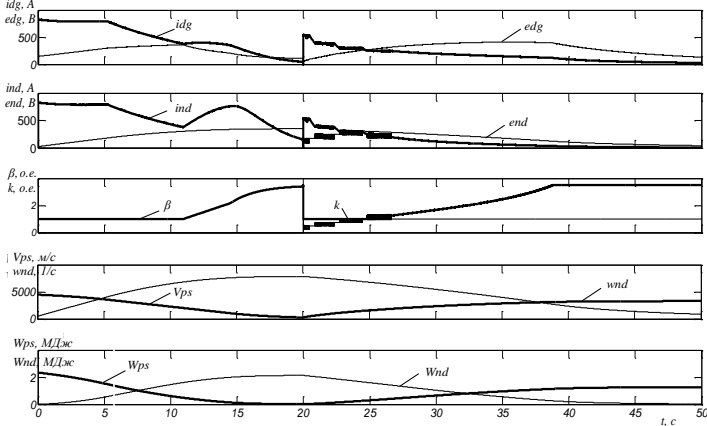


Рис. 2 – Результаты цифрового моделирования:  
 $W_{ps}$ ,  $W_{nd}$  – кинетическая энергия ЭПС и накопителя, соответственно

**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 «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 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.