

шинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 143 – 147. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова, А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. – Одесса: ОНПУ. – 2002. – 802 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Maslov, E. N. *Teorija shlifovanija metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. Print. 2. *Robochi procesy vysokyh tehnologij v mashynobuduvanni: navch. posibnyk*. Ed. A. I. Grabchenko. Kharkiv: KDPU, 1999. Print. 3. Popov, S. A., N. P. Malevskij and L. M. Tereshhenko. *Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdyh splavov*. Moscow: Mashinostroenie, 1977. Print. 4. Uzunjan, M. D. *Almazno-iskrovoe shlifovanie tverdyh splavov*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2003. Print. 5. Rjabenkov, I. A., and F. V. Novikov. "Ocenka vlijanija intensivnosti trenija svjazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost' processa shlifovanija." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prac'. Ser.: Innovaciyni tehnologii' ta obladnannja obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurgii'*. No. 43 (1086). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 143–147. Print. 6. *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*. Ed. F. V. Novikova, A. V. Yakimova. *V desjati tomah*. Vol. 4. "Teorija abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov." Odessa: ONPU, 2002. Print.

*Поступила (received) 18.03.2015*

УДК 625.282:625.032.07

**Е.С. РЯБОВ**, канд. техн. наук, ГП завод «Электротяжмаш», Харьков

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ В РЕЖИМЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА ТЯГОВОЙ СЕТИ**

Рассмотрено использование накопителей энергии в составе тягового электропривода электроподвижного состава. Показана целесообразность их использования в режиме ограничения тока тяговой сети при расположении накопителя энергии на подвижном составе. Предложен способ определения параметров накопителя при работе в режиме ограничения тока тяговой сети при его использовании в составе асинхронного тягового привода и получены аналитические расчетные выражения для определения параметров накопителя.

**Ключевые слова:** асинхронный тяговый привод, накопитель энергии, подвижной состав, тяговая характеристика.

**Введение.** Эффективным средством энергосбережения и повышения надежности работы электроподвижного состава является применение *накопителей энергии* (НЭ), которые позволяют аккумулировать энергию при торможении и обеспечивают ее отдачу в привод в тяговом режиме его работы [1]. Задача о выборе места расположения накопителя энергии – на транспортном средстве или на тяговой подстанции – очевидно, не может быть решена однозначно, поскольку накопитель может использоваться для разных целей. Между тем, в ряде работ, например, в [2], показано, что использование накопителей энергии на борту транспортного средства в целях аккумулирования энергии рекуперации имеет преимущества: во-первых, отсутствуют

© Е.С. Рябов, 2015

потери при передаче энергии между транспортным средством и тяговой подстанцией в режиме рекуперации; во-вторых, создаются условия для параллельной работы тяговой сети и накопителя энергии, что позволяет осуществить ограничение тока контактной сети в режиме тяги. В результате этого достигается выравнивание тягового тока, что также вызывает снижение потерь энергии в тяговой сети. Недостатком расположения НЭ на транспортном средстве является увеличение массы транспортного средства и снижение его пассажироместности.

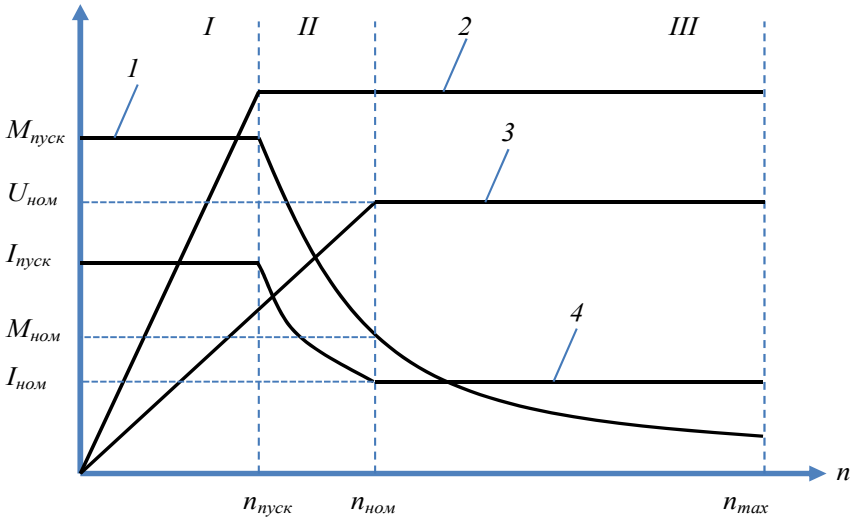


Рис. 1 – Характеристики тягового асинхронного электродвигателя  
 1 – зависимость момента от частоты вращения; 2 – зависимость мощности от частоты вращения; 3 – зависимость напряжения от частоты вращения; 4 – зависимость тока от частоты вращения;  $M_{пуск}$  – пусковой момент;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение;

$I_{пуск}$  – пусковой ток;  $M_{ном}$  – номинальный момент;  $I_{ном}$  – номинальный ток;

$n_{пуск}$  – частота окончания пуска;  $n_{ном}$  – номинальная частота вращения;

$n_{max}$  – максимальная частота вращения.

**Анализ исследований.** На сегодняшний день уже существуют десятки успешно реализованных тяговых приводов транспортных средств самого различного назначения, в которых НЭ расположен на борту транспортного средства [2, 3]. Однако, как правило, в публикациях не приводятся исходные предпосылки, которыми оперировали разработчики при выборе параметров тягового привода в целом и НЭ в частности. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть варианты потенциального использования накопителей энергии, расположенных на подвижном составе, и разработать подходы к выбору параметров НЭ. Поскольку современный подвижной состав оснащается, в основном, асинхронным тяговым приводом, расчеты выполним с учетом особенностей тягового привода этого типа.

**Постановка задачи.** Как упомянуто выше, использование НЭ на борту транспортного средства позволяет осуществлять выравнивание тока тягового сети. Рассмотрим способ определения параметров накопителя энергии в составе асинхронного тягового привода для случая его работы в указанном режиме.

**Результаты исследований.** Типовая зависимость мощности, момента, напряжения и тока от частоты вращения тягового асинхронного двигателя приведена на рис. 1.

Особенностью представленных характеристик является то обстоятельство, что переход к режиму работы с постоянной мощностью на валу осуществляется при напряжении менее номинального. Это обусловлено требованием уменьшения массы и габаритов асинхронного электродвигателя или необходимостью вписать тяговый двигатель в определенный монтажный объем. Как следствие, имеет место увеличение фазного тока электро-двигателя при работе с частотами, ниже номинальной, то есть до выхода на номинальное напряжение (зоны I и II на рис. 1). При работе в зоне с постоянным моментом (зона I на рис. 1) фазный ток может достигать удвоенного номинального. Работа с током такой величины непродолжительна, однако, наличие такого режима работы требует соответствующего увеличения токовой нагрузки оборудования тяговой подстанции (или другого источника энергии). В связи с этим представляется целесообразным применение накопителей энергии, работающих в режиме ограничения тока тяговой сети: ту часть тока, которая «превышает» некоторый заданный ток тяговой сети, необходимо отбирать от НЭ.

Рассмотрим способ определения параметров накопителя для асинхронного тягового привода в режиме ограничения тока тяговой сети. Примем, что ток тяговой сети должен соответствовать номинальному фазному току электродвигателя. Это допущение целесообразно, поскольку при работе в режиме постоянства мощности при постоянном напряжении (зона III рис. 1) фазный ток асинхронного двигателя изменяется всего на несколько процентов от его номинального значения.

Определим полную энергию, необходимую для разгона транспортного средства до номинальной скорости, при которой асинхронный тяговый двигатель начинает работать с номинальным напряжением и током. Она будет равна сумме, определяемой как сумма изменения кинетической энергии транспортного средства и работы силы тяги по преодолению сопротивления движению.

Поскольку номинальная частота вращения находится на гиперболическом участке тягового характеристики, то в этапе разгона необходимо выделить два участка: разгон с постоянной силой тяги (зона I на рис. 1) и разгон с постоянной мощностью (зона II на рис. 1).

Определим энергию, которую необходимо затратить на разгон транспортного средства. Используем для этого основные положения теории электрической тяги [5].

Сила тяги определяется по выражению

$$F_T = m(1 + \gamma) \frac{dV}{dt} + F_C, \quad (1)$$

где  $m$  – масса транспортного средства;  $(1 + \gamma)$  – коэффициент вращающихся масс,  $dV/dt$  – ускорение,  $F_C$  – сила сопротивления движению.

Работа силы тяги может быть определена по выражению

$$A_T = \int_{s_n}^{s_k} F_T ds. \quad (2)$$

Выражение (2) может быть представлено в виде

$$A_T = \frac{1}{2} m(1 + \gamma)(V_n^2 - V_k^2) + m \int_{s_n}^{s_k} F_C ds, \quad (3)$$

где  $V_n$ ,  $V_k$  – скорости начала и окончания пуска;  $s_n$ ,  $s_k$  – координата транспортного средства в начале и конце рассматриваемого режима соответственно.

Поскольку на этапе разгона выделено два участка, то выражение (3) следует применить для каждого из них.

Для участка разгона с постоянной силой тяги энергия определяется по выражению

$$A_I = \frac{1}{2} (1 + \gamma) V_I^2 + m \int_0^{s_I} F_C ds, \quad (4)$$

где  $V_I$  – скорость, при которой осуществляется переход от разгона с постоянной силой тяги к разгону с постоянной мощностью;  $s_I$  – путь, который проходит транспортное средство при разгоне с постоянной силой тяги.

Путь  $s_I$  определяется по выражению

$$s_I = m(1 + \gamma) \int_0^{V_I} \frac{V dV}{F_T - F_C}. \quad (5)$$

Для участка разгона с постоянной мощностью работа силы тяги определяется по выражению

$$A_{II} = \frac{1}{2} (1 + \gamma)(V_{II}^2 - V_I^2) + m \int_{s_I}^{s_{II}} F_C ds. \quad (6)$$

где  $V_{II}$  – скорость окончания пуска;  $s_{II}$  – путь, который проходит транспортное средство при разгоне с постоянной силой тяги.

Общая работа сил тяги равна сумме работ на каждом из участков

$$A_T = A_I + A_{II}. \quad (7)$$

Путь  $s_{II}$  определяется по выражению

$$s_{II} = m(1 + \gamma) \int_{V_I}^{V_{II}} V dV / (F_T - F_C), \quad (8)$$

при этом следует учитывать, что в диапазоне частот вращения от нуля до  $n_{\text{пуск}}$  сила тяги постоянна, а в диапазоне частот от  $n_{\text{пуск}}$  до  $n_{\text{ном}}$  определяется по выражению

$$F_T = P/V, \quad (9)$$

где  $P$  – мощность.

Электрическая энергия, подводимая к тяговому приводу, определяется суммой энергии, потребляемой из контактной сети, и энергии, получаемой от накопителя

$$A_{\Sigma} = A_{KC} + A_{HЭ}, \quad (10)$$

где  $A_{KC}$  – энергия, потребляемой из контактной сети;  $A_{HЭ}$  – энергия, забираемая от накопителя.

Энергия  $A_{KC}$  определяется по выражению

$$A_{KC} = \overline{\eta_{\text{ex}}} \int_{t_I}^{t_{II}} U_{KC} I_{KC} dt, \quad (11)$$

где  $\overline{\eta_{\text{ex}}}$  – среднее значение КПД входного преобразователя при работе в рассматриваемых режимах;  $U_{KC}$  – напряжение контактной сети;  $I_{KC}$  – ток контактной сети;  $(t_{II} - t_I)$  – время разгона транспортного средства до скорости  $V_{II}$ .

Если принять  $t_I$  равным нулю, то общее время разгона  $t_{II}$  может быть подсчитано по выражению

$$t_{II} = m(1 + \gamma) \int_0^{V_{II}} \frac{dv}{F_T - F_C}, \quad (12)$$

при этом следует учесть изменение выражения для силы тяги при скорости выше  $n_{\text{пуск}}$ .

Энергия, забираемая от накопителя, может быть определена по выражению

$$A_{HЭ} = \overline{\eta_{\text{cn}}} W, \quad (13)$$

где  $\overline{\eta_{\text{cn}}}$  – среднее значение КПД полупроводникового преобразователя, согласующего параметры электрической энергии, отдаваемой в тяговый привод;  $W$  – энергия накопителя.

Работы сил тяги и электрическая энергия, затраченная на разгон транспортного средства, связаны соотношением

$$A_T = \overline{\eta_{\text{мэн}}} A_{\Sigma}, \quad (14)$$

где  $\overline{\eta_{\text{мэн}}}$  – среднее значение общего КПД тягового привода (преобразователей, тяговых машин, редуктора) при работе в рассматриваемых режимах.

С учетом (7) – (14) энергия накопителя определяется по выражению

$$W = \frac{1}{\eta_{\text{cn}}} \left( \frac{A_I + A_{II}}{\eta_{\text{мэн}}} - A_{KC} \right). \quad (15)$$

Предложенный способ определения параметров НЭ для тягового асинхронного привода с ограничением тока тяговой сети может быть использован как для определения параметров накопителя энергии для его применения при модернизации существующих асинхронных тяговых приводов, так и с целью определения оптимальных параметров НЭ и асинхронного тягового привода для новых разработок.

**Выводы.** В статье рассмотрено использование асинхронного тягового привода с накопителем энергии для ограничения тока тяговой сети и предложен способ определения его параметров. Изложенный подход к определению параметров накопителя энергии может быть использован для других случаев его применения.

**Список литературы:** 1. *Омельяненко В.И., Бондаренко В.Е., Омельяненко Г.В., Оверьянова Л.В.* Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: Техностандарт. – 2011. – №4. – С. 4 – 9. 2. *Спирidonov Е.А.* Применение накопителей энергии для выравнивания нагрузок в системе электроснабжения городского электрического транспорта // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1. – С. 258 – 262. 3. Экономика энергии на рельсовом транспорте Японии // Железные дороги мира – 2013. – №8. – С. 47 – 53. 4. Перспективы рынка дизельного подвижного состава в Европе // Железные дороги мира – 2012. – №1. – С. 38 – 42. 5. *Осипов С.И.* Теория электрической тяги [Текст]: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов ; под. ред. С.И. Осипова – М.: Маршрут, – 2006.

**Bibliography (transliterated):** 1. Omel'janenko, V. I., et al. "Nakopiteli energii – perspektivnaja tehnologija dlja zheleznyh dorog." *Mizhnarodnyj informacijnyj naukovo-tehничnyj zhurnal «Lokomotiv-inform»*. No. 4. 2011. Kharkiv: Tehnostandart. 4–9. Print. 2. Spiridonov, E. A. "Primenenie nakopitelej energii dlja vyравnivanja nagruzok v sisteme elektrosnabzhenija gorodского elektricheskogo transporta." *Nauch. problemy transp. Sibiri i Dalnego Vostoka*. No. 1. 2008. 258–262. Print. 3. "Ekonomija energii na rel'sovom transporte Japonii." *Zheleznye dorogi mira*. No. 8. 2013. 47–53. Print. 4. "Perspektivy rynka dizel'nogo podvizhnogo sostava v Evrope." *Zheleznye dorogi mira*. No. 1. 2012. 38–42. Print. 5. Osipov, S. I., S. S. Osipov and V. P. Feoktistov. *Teorija elektricheskoj tjagi. Uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta*. Ed. S. I. Osipov. Moscow: Marshrut, 2006. Print.

*Поступила (received) 02.03.2015*

УДК 629.113+629.331

**В.П. САХНО**, д-р техн. наук, проф., НТУ, Київ;  
**В.М. ПОЛЯКОВ**, канд. техн. наук, проф., НТУ, Київ;  
**О.М. ТИМКОВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ, Київ;  
**О.С. ІВАНОВ**, аспірант, НТУ, Київ

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АГРЕГАТИВ ГСУ  
ТА РЕЖИМІВ ЇХ РОБОТИ ДЛЯ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ В  
ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

© В. П. Сахно, В. М. Поляков, О. М. Тімков, О. С. Іванов, 2015