

УДК 621.314

**О. Н. Синчук**, д-р техн. наук,  
**Э. С. Гузов**, **И. О. Синчук**, кандидаты техн. наук,  
**Д. О. Кальмус**

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ В ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы оценки вариантов преобразования электрической энергии энергоэффективных тяговых электроприводов постоянного тока. Выделены преимущества и недостатки существующих структур тяговых электроприводов, предложены пути улучшения быстродействия и надежности их работы.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, преобразование энергии, гармоники, тормозной режим

**O. N. Sinchuk**, ScD.,  
**E. S. Guzov**, PhD., **I. O. Sinchuk**, PhD.,  
**D. O. Kalmus**

## ENERGYEFFECTIVE STRUCTURES OF HAULING ELECTRIC DRIVES ARE IN BRAKE MODES

**Abstract.** Questions of transformation of electric energy of hauling electric drive of direct-current was considered. Advantages and lacks of existent structures of hauling electric drives were educed, the ways of improvement of fast-acting and reliability of their work offered.

**Keywords:** hauling electric drive, transformation of energy

**О. М Синчук**, д-р техн. наук,  
**Е. С. Гузов**, **И. О. Синчук**, кандидаты техн. наук,  
**Д. О. Кальмус**

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СТРУКТУРИ ТЯГЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИВОДІВ У ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

**Анотація.** Розглянуті питання оцінки варіантів перетворення електричної енергії енергоефективних тягових електроприводів постійного струму. Виділені переваги й недоліки існуючих структур тягових електроприводів, запропоновані шляхи поліпшення швидкодії й надійності їх роботи.

**Ключові слова:** тяговий електропривод, перетворення енергії, гальмівний режим

**Введение.** Вопрос энергоэффективности электроприводов особенно актуален для их тяговых вариантов в различных видах электрифицированного транспорта [1 – 3].

В настоящее время, как и прежде, основным видом тяговых электроприводов (ТЭП) является электропривод постоянного тока на базе двигателей постоянного тока последовательного возбуждения [4 – 7]. Этот вид привода сыграл свою весомую положительную роль в развитии электрифицированных видов транспорта и призван в ожидании замены на другие более энергоэффективные типы функционировать еще не один десяток лет [8 – 11]. Поэтому проблема модернизации структур тяговых электроприводов постоянного тока в направлении поиска новых эффективных вариантов была и остается актуальной.

В ряде работ приведены варианты строения современных структур энергоэффективных тяговых электроприводов постоянного тока [3 – 7]. Все предлагаемые варианты обладают авторским видением и реальными показателями энергоэффективности. Вместе с тем, решив в той или иной степени анализируемую проблему эти варианты наталкивают исследователей на поиск новых еще более эффективных решений [6, 7].

**Целью работы** является обоснование и разработка вариантов схмотехнических решений энергоэффективного преобразования электрической энергии в тяговых электроприводах постоянного тока.

**Материалы исследований.** Предлагается несколько вариантов структур ТЭП.

Преобразователь с двухуровневым регулированием напряжения при последовательно-параллельном соединении тяговых электрических двигателей (рис. 1.) имеет взаимосвязанные цепи управления двумя тяговыми двигателями электровоза. Электропривод может работать в тяговом или тормозном режиме.

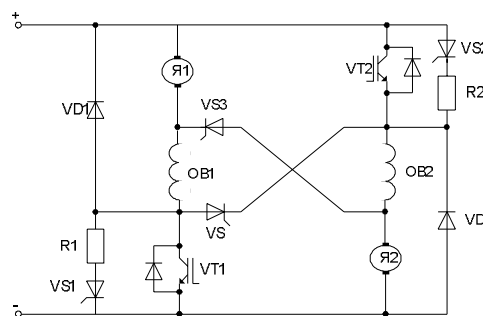


Рис. 1. Структура преобразователя с двухуровневым регулированием напряжения

© Синчук О.Н., Гузов Э.С., Синчук И.О.,  
Кальмус Д.О., 2014

В тяговом режиме в процессе импульсной коммутации двигателей они переключаются в течение каждого периода с последовательного на параллельное соединение.

В тормозном режиме линейный контактор отключает питание и включаются тормозные тиристоры VS1-3, при этом подсоединяются тормозные резисторы R1-2 и собирается перекрестная схема динамического торможения.

Регулирование тормозного режима осуществляется ШИМ VT1-2, которые постепенно шунтируют тормозные резисторы R1-2 до полного их замыкания, что обеспечивает эффективное торможение почти до остановки. Перекрестная схема торможения – традиционная для тяговых электроприводов – обеспечивает выравнивание тормозных токов двигателей.

Главным достоинством схемы с двухуровневым регулированием напряжения по сравнению с другими схемами является минимизация суммарных потерь в электроприводе – в импульсном преобразователе и тяговых двигателях. За счет снижения вдвое амплитуды пульсаций напряжения и тока пульсационные потери в тяговых двигателях снижаются в четыре раза, а они являются определяющими.

При нагрузках близких к максимальным по условиям сцепления и большой вероятности буксования схема с двухуровневым регулированием не позволяет перераспределять нагрузки двигателей и в полной мере реализовать тяговые и тормозные возможности электровоза.

Преобразователь с одноуровневым независимым регулированием напряжения на тяговых двигателях (рис. 2) содержит всего один IGBT-транзистор VT, обеспечивающий широтно-импульсное регулирование (ШИМ) как в двигательном, так и в тормозном режиме.

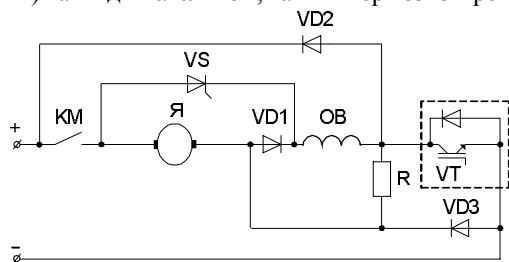


Рис. 2. Структура тягового ЭП с независимым регулированием

В двигательном режиме ток проходит по цепи: +, Я, VD1, OB, VT, «-», а при заперении VT замыкается через обратный диод VD2. Используя ШИМ, напряжение на двигателе плавно регулируется от 0 до напряжения источника.

В тормозном режиме отключается питание линейным контактором KM и включается тормозной тиристор VS. За счет остаточного магнитного потока двигатель возбуждается и тормозной ток проходит по цепи: Я, VS, OB, R. Тормозной резистор R плавно шунтируется VT, работающем в режиме ШИМ, что обеспечивает эффективное торможение до малых скоростей. Диод VD1 выполняет функцию разделения цепей двигательного и тормозного режимов.

Суммарные потери в рассматриваемой структуре электропривода относительно невелики по сравнению с другими схемами [3]. В самом преобразователе тяговый ток протекает по двум последовательно соединенным вентилям VD1 и VT, что создает в них потери того же порядка, что и в других схемах, зато снижает пульсационные потери в двигателе вдвое, а также снижает перенапряжения в схеме и улучшает коммутацию на коллекторе.

Важным достоинством схемы является возможность независимого регулирования тяговых и тормозных усилий, развиваемых каждым из двигателей, что позволяет максимально реализовать тяговые возможности электровоза на пределе сцепления.

Все варианты схем при переходе в тормозной режим предусматривают самовозбуждение тяговых двигателей за счет остаточного магнитного потока, который может иметь различные значения в зависимости от предшествовавшего тока и возможны отказы торможения, особенно при небольших скоростях. С тем, чтобы гарантировать торможение двигателей в некоторых схемах предусматривают блоки предвозбуждения с питанием от специальной аккумуляторной батареи, которые создают в обмотке возбуждения начальный импульс тока. Это существенно усложняет схему электропривода, а для контактных условий неприемлемо вообще, то следует искать другие пути.

Работа схемы торможения может быть улучшена, если реверсировать обмотку якоря, тогда по обмотке возбуждения будет протекать ток только одного направления и остаточный магнитный поток будет иметь максимальное значение.

### Выводы

1. Оптимальной по критерию минимальных общих потерь в системе тягового электропривода является схема преобразования электрической энергии с двухуровневым регулированием напряжения (рис. 1), но максимальная реализация тяговых возможностей многоосного электровоза достигается при независимом регулировании тяговых двигателей в тяговом и тормозном режимах (рис. 2).

2. Для повышения надежности электрического торможения целесообразно реверсировать только обмотки якорей, что позволит увеличить уровень остаточного магнитного потока тяговых электрических двигателей и тем самым уменьшить время и повысить эффективность процесса электрического торможения электровозов.

### Список использованной литературы

1. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією / Г. Г. Півняк, О. В. Волков. – Дніпропетровськ : ДНГУ, 2006. – 470 с.
2. Зеленев А. Б. Теория электропривода. Часть 1: Уч. пособ. / А. Б. Зеленев. – Алчевск : ДонГТУ, 2005. – 394 с.
3. Синчук О. Н. Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте / О. Н. Синчук, В. В. Чумак, О. В. Ершов – К. : АДЕФ, 1998. – 280 с.

4. Синчук О. Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Н. Н. Юрченко, А. А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – К. : ІЕДНАНУ, 2006. – 252 с.

5. Oberg B., (2002), Computer-Controller ore Transformation at the LKAB Mine in Kiruna, *Sweden Information of ASEA*, 212 p.

6. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – № 6. – С. 30 – 31.

7. Синчук О. Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О. Н. Синчук, С. В. Лебедкин, И. О. Синчук, О. О. Удовенко, О. В. Пасько // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83 – 92.

8. Удовенко О. А. Энергосберегающая система тягового электропривода рудничного аккумуляторного электровоза: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук / Удовенко Олег Александрович; Криворожский технический университет. – Кривой Рог, 2004. – 15 с.

9. Якимець С. М. Структура та режими функціонування тягового електротехнічного комплексу двохосьових електровозів : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Якимець Сергій Миколайович ; Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2011. – 20 с.

10. Жеребкин Б. В. Система векторного управления электроприводом рудничных электровозов с использованием аппарата нечеткой логики: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук / Жеребкин Богдан Васильевич; Санкт-Петербургский гос. горный ин-т имени Г. В.Плеханова. – Санкт-Петербург, 2005. – 19 с.

11. Проценко Д. Підвищення енергоефективності керування тяговим двигуном рухомого складу міського електротранспорту / Д. Проценко, В. Чуба // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании. – Днепропетровськ, 2010. – 18 с. Получено 04.07.2014

#### References

1. Pivnyak G.G., and Volkov O.B. Suchasni chastotno-regulovani asynhroni elektropyvody z shyrotno-impulsnoy modulyatsiyei [Modern Frequency-Managed Asynchronous Drives with Latitudinal-Impulsive Modulation], (2006), Dnepropetrovsk, Ukraine, *DNGU*, 470 p. [In Ukrainian].

2. Zelenov A.B. Teoriya elektropivoda. Chast 1 [Theory of Electromechanic. Part 1.], (2005), Alchevsk, Ukraine, *DonGTU*, 394 p. [In Russian].

3. Sinchuk O.N., Chumak V.V., and Erzhov O.V. Impulsnyye sistemy upravleniya i zashita na rudnichnom elektrovoznom transporte [Impulsive Control System and Securing for a Mine Electric Locomotive Transport], (1998), Kiev, Ukraine, *ADEF*, 280 p. [In Russian].

4. Sinchuk O.N. Kombinatorika preobrazovateley napryazheniya sovremenyh tyagovyh elektropivodov rudnichnyh elektrovov [Combinatorics of Transformers of

Tension of Modern Hauling Eelectromechanics of Mine Electric Locomotives], (2006), Kiev, Ukraine, *IEDNANU*, 252 p. [In Russian].

5. Oberg B. Computer-Controller ore Transformation at the LKAB Mine in Kiruna, (2002), *Sweden Information of ASEA*, 212 p. [In English].

6. Debelyi V.L. Osnovnye napravleniya razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta [Basic Directions of Development of Mine Locomotive Transport], (2006), *Ugol Ukrainy*, Ukraine, Vol. 6, pp. 30 – 31 [In Russian].

7. Sinchuk O.N. Perspektivy razvitiya shahtnyh elektrovovov s energosberegayushimi vidami tyagovyh elektropivodov [Prospects of Development of Mine Electric Locomotives with the Energy-Saving Types of Hauling Electromechanics], (2006), Lugansk, Ukraine, *Visnyk SNU im. V.Dalya*, Vol. 8(102), pp. 83 – 92 [In Russian].

8. Udoenko O.A. Energosberegayushaya sistema tyagovogo elektropivoda rudnichnogo akumulatornogo elektrovova [Energy-Saving System of Hauling Electromechanic of Mine Storage-Battery Electric Locomotive], (2004), Krivoy Rog, Ukraine, *KTU*, 15 p. [In Russian].

9. Yakimets S.N. Struktura ta rezhimy funktsionuvanya tyagovogo elektrotehnichnogo kompleksu dvohosovyh elektrovov [Structure and Modes of Functioning of Hauling Electrical Engineering Complex of Two-Axial Electric Locomotives], (2011), Kremenchuk, Ukraine, *KNU*, 20 p. [In Ukrainian].

10. Zhrebkin B.V. Sistema vektornogo upravleniya elektropivodom rudnichnyh elektrovovov s ispolzovaniem aparata nechetkoy logiki [System of Vectorial Management of Electric Drive of Mine Electric Locomotives with the use of Vehicle of Fuzzy Logic], (2005), St. Petersburg, Russian Federation, 19 p. [In Russian].

11. Protsenko D. Pidvyshenya energoefektyvnosti keruvanya tyagovym dvygunom ruhomogo skladu miskogo elektrotransportu [Increase of Energy Efficiency of Hauling Engine Management of Rolling Stock of Municipal Electric Transport], (2000), Dnipropetrovsk, Ukraine, *Sovremenyje Informatsionye Tehnologii*, 8 p. [In Ukrainian].



Синчук  
Олег Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АЭМС, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т», Украина, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Гузов  
Эдуард Семенович, канд. техн. наук, доц. каф. АЭМС, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т», Украина, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Синчук  
Игорь Олегович, канд. техн. наук, доц. каф. АЭМС, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т», Украина, г. Кривой Рог.  
E-mail: speet@ukr.net



Кальмус  
Дмитрий Олегович, ассистент каф. АЭМС, ГВУЗ «Криворожский нац. ун-т», Украина, г. Кривой Рог, т. 097-692-9796.  
E-mail: speet@ukr.net