

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ*

УДК 621.314.58

**ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ЗОННОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ  
АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ  
ДЛЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА\***

Е.Ю. АБРАМОВ<sup>1</sup>, В.В. ИВАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент кафедры электротехнических комплексов. E-mail: ewgeniyabramow@gmail.com

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры электротехнических комплексов. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru

В настоящее время перспективными направлениями повышения эффективности электрического транспорта являются создание и внедрение новых современных технологий в области электроподвижного состава и систем тягового электроснабжения. В этой ситуации немаловажная роль отводится применению новых схемных решений и принципов управления зонных преобразователей. Рассматривается применение трехфазного зонного преобразователя для обеспечения условий реализации адаптивного регулирования распределения мощности в системе тягового электроснабжения городского электрического транспорта. Произведено обоснование применения зонных выпрямителей. Выполнено формирование принципов работы зонного преобразователя при реализации адаптивного регулирования. Оценена эффективность применения трехфазного зонного преобразователя как способа реализации регулирования выходного напряжения при одинаково высоких энергетических показателях. Доказано, что адаптивное регулирование выходного напряжения позволит стабилизировать уравнильные токи, уменьшить потребляемые токи, сократить напряжение во всех участках контактной сети и снизить удельный расход электрической энергии.

**Ключевые слова:** зонный преобразователь, распределение мощности, адаптивное регулирование, тяговая подстанция, удельный расход электрической энергии

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-114-121

---

\* Статья получена 25 октября 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Действующей структуре электроснабжения городского электрического транспорта (ГЭТ) как одного из наиболее крупных городских потребителей электрической энергии присущи системные недостатки, одним из главных является высокий показатель потерь электрической энергии ввиду разнопеременных режимов работы, связанных с неравномерностью перемещения нагрузки на зонах питания тяговой сети.

Величина потерь зависит от сопротивления контактной сети и тока, протекающего в ней. Сопротивление системы определяется ее износом, а величина протекающего по контактной сети тока – уровнем напряжения.

В связи с развитием полупроводниковой техники, и в частности управляемых выпрямителей, появляется возможность регулировать распределение мощности нагрузки на тяговые агрегаты. Также при использовании управляемых преобразователей в составе тяговой подстанции появляется возможность регулирования количества работающих выпрямительных агрегатов в зависимости от действующей нагрузки – это повышает показатели энергетических характеристик системы.

В соответствии с ГОСТ 6962-75 номинальное напряжение на шинах тяговой подстанции трамвая и троллейбуса должно составлять 600 В, наибольшее допустимое значение при любых эксплуатационных условиях, за исключением коммутационных режимов, должно составлять 700 В, номинальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава 550 В, наибольшее 700 В (750 В на участках с применением рекуперативного торможения) и наименьшее 400 В. Однако ГОСТ 29322-92 не рекомендует использовать эти уровни напряжения при создании новых сетей, в этом случае рекомендованы значения 750, 900 и 500 В соответственно, что расширяет область регулирования выпрямительных агрегатов.

## 1. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗОННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Главное преимущество такого преобразователя заключается в том, что он одинаково эффективно работает в широком диапазоне регулирования выходного напряжения при одинаково высоких энергетических показателях, в то время как у мостовых управляемых выпрямителей эффективность уменьшается с увеличением глубины регулирования. Такие выпрямители нашли применение на железнодорожном транспорте [9].

Использование зонных преобразователей на подстанции электрического транспорта создаст условия организации адаптивного управления распределением тяговой нагрузки с оптимизацией режимов функционирования систе-

мы в соответствии с непрерывно изменяющимися условиями работы электро-транспортного комплекса. Под оптимизацией режимов работы можно понимать следующие факторы:

- значения приведенных потерь электроэнергии в контактной сети и преобразовательных агрегатах подстанции;
- широкомасштабная реализация рекуперативного торможения с потенциалом сокращения удельного энергопотребления вплоть до 40 %;
- уровни напряжения на токоприемниках ЭПС, отклонения и колебания, влияющие на и тяговые характеристики ЭПС и соответственно на показатели их эффективности.

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ПРИЦИПОВ РАБОТЫ ЗОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Реализация адаптивного регулирования распределения мощности подразумевает переход от одностороннего питания к двухстороннему, что при условии эквипотенциальности смежных ТП позволяет обеспечить снижение технологических потерь электрической энергии в контактной сети до двух раз [5].

Нагрузка в тяговой сети непрерывно меняется, это непосредственно влияет на выходное напряжение каждой подстанции, т. е. возникает разность потенциалов, что существенно увеличивает потери перегруженной ТП.

Уровни напряжения ТП ГЭТ варьируются в пределах 10...50 В, относительно длительные отклонения составляют 5...20 В. В отдельных случаях зафиксированы более существенные отклонения, достигающие 70...90 В. Зависимость разницы напряжений на ТП от величины потерь представлена на рис. 1.

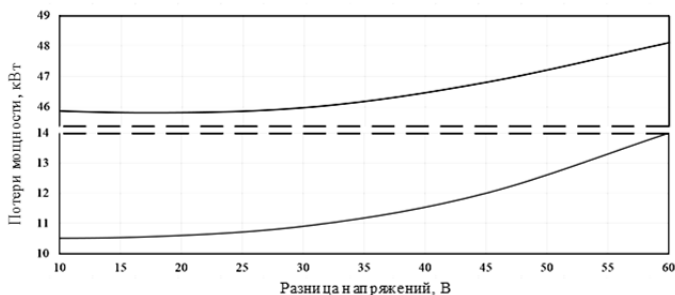


Рис. 1. Зависимость потерь мощности в тяговой сети от разницы напряжений при различной нагрузке

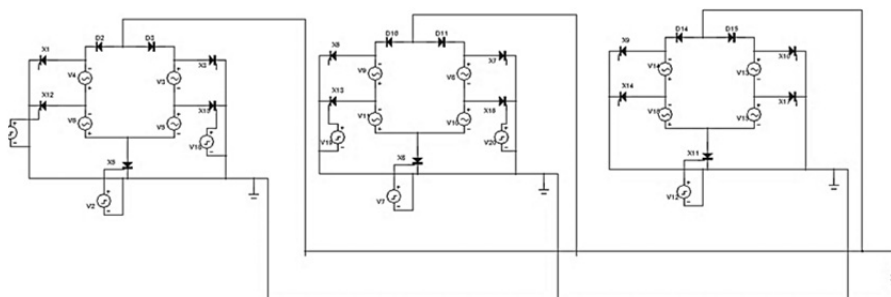
Поэтому для обеспечения минимума потерь при подводе энергии к электроподвижному составу необходимо снизить напряжение на перегруженной ТП и повысить на недогруженной.

Также в алгоритм работы будут включены условия для увеличения доли рекуперативного торможения за счет снижения напряжения на шинах ТП.

При повышении напряжения в контактной сети выше уровня 750 В, возникающего при рекуперативном режиме, преобразователь переводится на минимальный уровень стабилизации напряжения 400 В. Этим обеспечивается передача энергии рекуперации в сеть.

### 3. ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Расчет и анализ энергетических показателей трехфазного зонного выпрямительного агрегата выполнен в среде имитационного моделирования Micro-Cap [7]. На рис. 2 представлен фрагмент схемы.



Очевидно, что предлагаемый подход позволяет реализовать регулирование выходного напряжения при одинаково высоких энергетических показателях, что является одним из условий организации адаптивного управления на ТП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация регулируемого токораспределения с минимизацией потерь электроэнергии за счет использования зонных преобразователей открывает качественно новые подходы к организации электроснабжения и, что особенно важно, для надежности и энергоэффективности. Это следует понимать как непрерывную эволюцию системы тягового электроснабжения под энергопотребление транспортных средств.

Адаптивное регулирование выходного напряжения позволит стабилизировать уравнительные токи, уменьшить потребляемые токи, сократить напряжение во всех участках контактной сети и снизить удельный расход электрической энергии в системе ГЭТ, благодаря чему только в муниципальном управлении электротранспорта города, по предварительным расчетам, предполагается сэкономить около 10 млн рублей в год. Повышение надежности работы силового оборудования подвижного состава составит 30...40 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сопов В.И., Щуров Н.И.* Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе: учебник для вузов по направлению подготовки 140400 – «Энергетика и электротехника» модуль «Электротехника». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 727 с.
2. *Джаборов М.М., Мятаж С.В., Щуров Н.И.* Совершенствование четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электровозов переменного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 73–77.
3. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники. Ч. 1: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
4. Development prospects of single-phase zone rectifiers / V. Ivanov, S. Myatezh, A. Kapustin, I. Alekseeva // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016): proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 2. – P. 105–107. – ISBN 978-1-5090-0853-7.
5. *Абрамов Е.Ю., Бабаева О.В., Антипин И.Ю.* Исследование работы многопульсных выпрямителей при несимметрии и несинусоидальности напряже-

ний питающей сети // Студент и научно-технический прогресс. Транспорт: материалы 52 международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 11–18 апреля 2014 г. – Новосибирск, 2014. – С. 13.

6. Капустин А.В., Алексеева И.К., Иванов В.В. Перспективы развития однофазных зонных выпрямителей тока // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 83–84. – ISBN 978-5-7782-2860-3.

7. Pulse-width control in ladder structure four-phase rectifier for AC-electromotive / V.V. Ivanov, S.V. Myatez, E.G. Langeman, N.I. Schurov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 127, N 1. – Art. 012004. – doi: 10.1088/1757-899X/127/1/012004.

8. Иванов В.В., Мятеж С.В. Пути повышения энергетических показателей зонных выпрямителей // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 72–74.

9. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог: учебник для вузов ж.-д. транспорта. – 4-е изд. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.

**Абрамов Евгений Юрьевич**, ассистент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – повышение энергетических показателей в электротранспортном комплексе. Имеет 10 публикаций. E-mail: ewgeniyabramow@gmail.com

**Иванов Владлен Владимирович**, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – повышение энергетических показателей в электротранспортном комплексе. Имеет 13 публикаций. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru

## The use of three-phase converter to implement adaptive voltage regulation for urban electric transport\*

E.Yu. Abramov<sup>1</sup>, V.V. Ivanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, Russia, Novosibirsk, PR. Karla Marksa, 20, Novosibirsk state technical University, assistant of the Department of electrical engineering complexes. E-mail: ewgeniyabramow@gmail.com

<sup>2</sup> 630073, Russia, Novosibirsk, PR. Karla Marksa, 20, Novosibirsk state technical University, postgraduate student of the Department of electrical engineering complexes. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru

Currently, promising ways of increasing the efficiency of electric vehicles is the creation and implementation of new technologies in the field of electric rolling stock and traction electric supply systems. In this situation, an important role is given to the use of new circuit design and band converters management principles. INDICATES-regarded use of the three-phase zone converter to provide condition-tions implementing adaptive power distribution control system of traction current city electric transport. Produced rationale for the use of the band rectifiers. Skill formation of the Principles of the work zone converter when implementing adaptive regulation-tion. The efficiency of the use of a three-phase inverter of the band as a way of implementing the output voltage regulation when the same-you sokih energy performance. It is proved that the adaptive control you-output voltage will stabilize equalizing currents reduce the current consumed, reduce stress in all areas of contact network, which will reduce the specific consumption of electric energy.

**Keywords:** zone converter, distribution of the power, adaptive control, traction substation, the specific consumption of electrical energy

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-114-121

## REFERENCES

1. Sopov V.I., Shchurov N.I. *Sistemy elektrosnabzheniya elektricheskogo transporta na postoyannom toke* [Power systems electric vehicles DC]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 727 p.
2. Dzhaborov M.M., Myatezh S.V., Shchurov N.I. Sovershenstvovanie chetyrehkhonnogo vypryamitelya s lestnichnoi strukturoi dlya elektrovozov peremennogo toka [Improving the four-rectifier c ladder structure for electricne alternating current]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 73–77.
3. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki*. Ch. 1 [Fundamentals of power electronics. Pt. 1]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1999. 199 p.
4. Ivanov V., Myatezh S., Kapustin A., Alekseeva I. Development prospects of single-phase zone rectifiers. *11th International Forum on Strategic Technology*

---

\* Received 25 October 2016.

(*IFOST 2016*): proceedings, Novosibirsk, 1–3 June 2016, pt. 2, pp. 105–107. ISBN 978-1-5090-0853-7.

5. Abramov E.Yu., Babaeva O.V., Antipin I.Yu. [Research work mnogopulsnyh rectifiers with voltage unbalance and non-sinusoidal mains]. *Student i nauchno-tekhnicheskii progress. Transport: materialy 52 mezhdunarodnoi nauchnoi studencheskoi konferentsii* [Student and scientific and technical progress. Transport: 52 materials international scientific student conference]. Novosibirsk, 11–18 April 2014, p. 13. (In Russian)

6. Kapustin A.V., Alekseeva I.K., Ivanov V.V. [Prospects for the development of single-phase rectifiers band]. *Nauchnyi potentsial studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoi oblasti* [The scientific potential of students and young scientists of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016, pp. 83–84. ISBN 978-5-7782-2860-3. (In Russian)

7. Ivanov V.V., Myatezh S.V., Langeman E.G., Schurov N.I. Pulse-width control in ladder structure four-phase rectifier for AC-electromotive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127, no. 1, art. 012004. doi: 10.1088/1757-899X/127/1/012004

8. Ivanov V.V., Myatezh S.V. [Ways to improve the energy performance of the band rectifiers]. *Nauchnyi potentsial studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoi oblasti* [The scientific potential of students and young scientists of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014, pp. 72–74.

9. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. *Podvizhnoi sostav elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Rolling electrified railways]. 4th ed. Moscow, Transport Publ., 1980. 471 p.