

УДК 621.3

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ ЗОННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ ЛЕСТНИЧНОГО ТИПА

А.В. Капустин, И.К. Алексеева, В.В. Иванов, С.В. Мятёж
Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время наиболее энергоэффективным устройством, предназначенным для преобразования переменного тока в постоянный, является зонный преобразователь, построенный на базе управляемых силовых полупроводниковых приборов: тиристоров и транзисторов. В основе этих преобразователей лежит метод зонно-фазового регулирования. В работе рассматривается построение микропроцессорной системы управления силовым модулем усовершенствованного четырехзонного выпрямителя. Поставлены и решены задачи, направленные на достижение энергоэффективности, обоснована актуальность задач. Показаны этапы разработки микропроцессорной системы управления, включающие создание драйверов с гальванической развязкой для управления тиристорами и транзисторами, устройства синхронизации с питающей сетью. Приведен алгоритм управления силовыми полупроводниковыми приборами, заложенный в программу управления. Для лучшего понимания принципа работы системы приведена блок-схема, составленная по написанной для микроконтроллера программе, которая отражает алгоритм работы системы управления. По проделанной работе сделаны выводы и намечены цели для дальнейших исследований.

Ключевые слова: микропроцессорная система, зонный выпрямитель, оптическая гальваническая развязка, синхронизация с сетью.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-70-79

Введение

Повышение энергетических показателей является одним из важнейших направлений развития электротехники, так как от них напрямую зависит экономия электроэнергии, производство которой с каждым годом становится дороже. На кафедре ЭТК НГТУ ведутся разработки по усовершенствованию имеющихся преобразовательных устройств с улучшенными энергетическими показателями [1]. В этих устройствах используются современные силовые полупроводниковые приборы (СПП) – IGBT транзисторы, обеспечивающие возможность секторного регулирования, и тиристоры, которые требуют наличия эффективной и безопасной системы управления. На рис. 1 показана структурная схема преобразователя, установленного на электропоезд.

В ходе исследований должны быть решены следующие задачи:

- создание алгоритма управления усовершенствованной схемой зонного выпрямителя;
- составление программы для однокристального микроконтроллера;
- обеспечение согласованной работы системы управления с силовым модулем;
- проверка работоспособности системы путем проведения эксперимента.

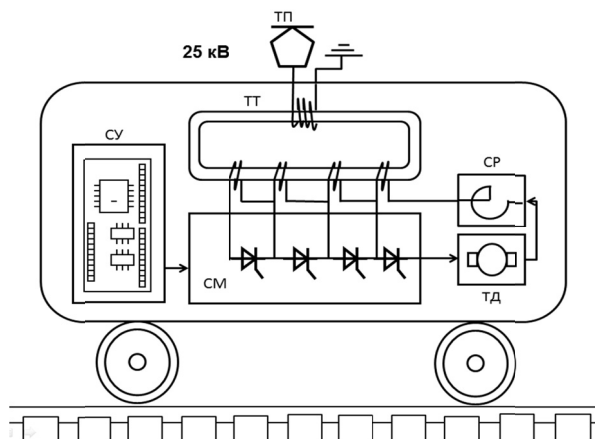


Рис. 1 – Структурная схема преобразователя, установленного на электропоезд: ТП – токоприемник, ТТ – тяговый трансформатор, СУ – система управления, СР – сглаживающий реактор, ТД – тяговый двигатель, СМ – силовой модуль

Fig. 1 – The structural diagram of the converter installed on the electric train: ТП is a pantograph, ТТ is a traction transformer, СУ is a control system, СР is a smoothing reactor, ТД is a traction engine, СМ is a power module

1. Разработка системы управления

Для правильного функционирования силового модуля зонного выпрямителя предлагается электронная микропроцессорная система, представляющая как аппаратную, так и программную реализацию многоканальной системы управления. Ввиду того, что отдельные части силового модуля схемы будут находиться под различными потенциалами большой величины (рис. 2) [2], возникает опасность электрического пробоя низковольтной части системы управления и потери управления электровозом. Высокий электрический потенциал, кроме того, представляет опасность для человека, который работает непосредственно с системой управления.

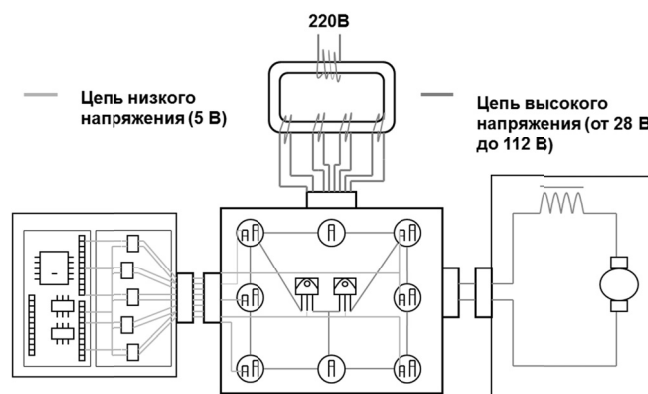


Рис. 2 – Структурная схема модели

Fig. 2 – Structural diagram of the model

Во избежание этого необходимо предусмотреть связующий элемент между системой управления и силовым модулем. Таким элементом в работе предложен модуль драйверов с гальванической развязкой, наличие которой позволит обеспечить передачу сигналов управления без передачи опасного электрического потенциала (рис. 3) [3].

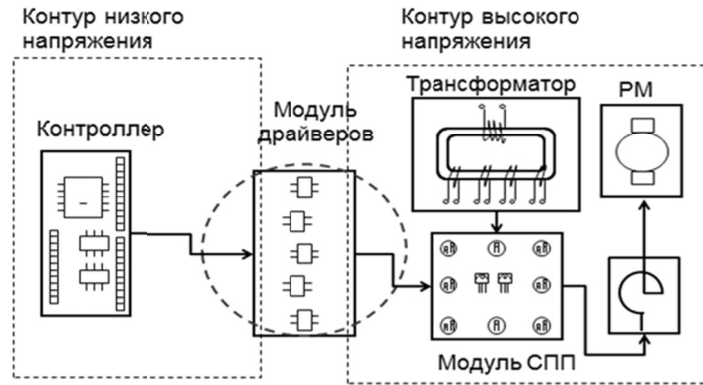


Рис.3 – Гальваническая развязка между цепями с разными потенциалами

Fig. 3 – Galvanic isolation between circuits with different potentials

Гальваническая развязка в модуле драйвера достигнута благодаря использованию оптрона. Авторами разработаны и успешно испытаны на практике модули драйверов с гальванической развязкой для управления IGBT-транзисторами и тиристорами. Схемные решения таких драйверов, предложенные авторами, приведены на рис. 4 и 5.

Такие драйверы исключают выход из строя системы управления в случае пробоя СПП силового модуля и снижают риск поражения электрическим током.

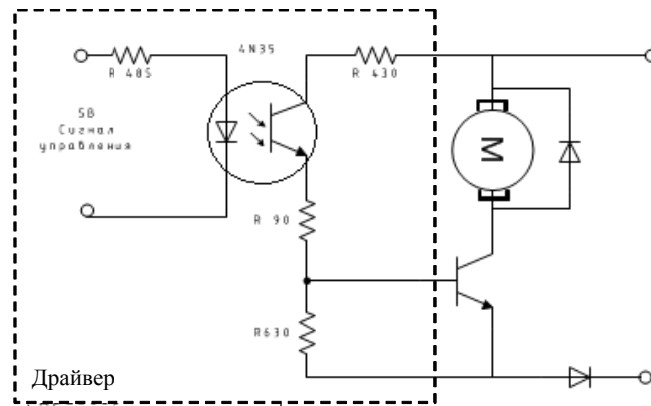


Рис.4 – Электрическая схема драйвера для одного транзистора

Fig. 4 – The driver electric circuit for a single transistor

Чтобы правильно организовать управление в сети переменного тока, на управляемые СПП выпрямителя необходимо подавать импульсы управления в определенные моменты времени, которые синхронизованы по фазе с питающим напряжением. Для этого необходимо устройство, позволяющее определить начало

отсчета в сети однофазного переменного тока. В качестве источника сигнала положения фазы питающего напряжения используется одна из вторичных обмоток силового трансформатора. Напряжение с этой обмотки подается на устройство – детектор, которое программным путем отслеживает положение синусоиды питающего напряжения в режиме реального времени.

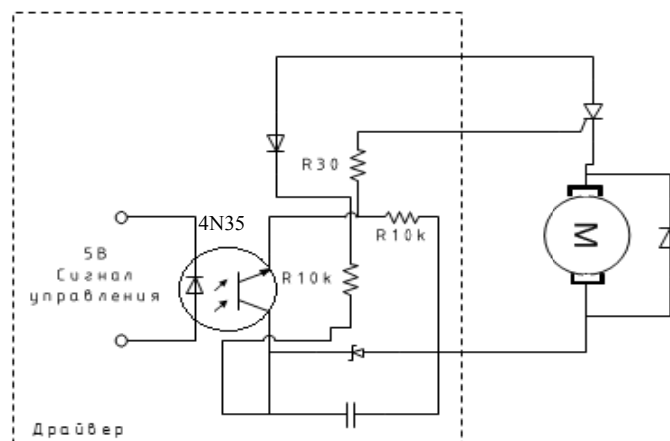


Рис. 5 – Электрическая схема драйвера для одного тиристора

Fig. 5 – The driver electric circuit for a single thyristor

В основе микропроцессорной системы управления лежит RISC – архитектурный микроконтроллер ATmega2560. Источником входного сигнала управления является задатчик, положение рукоятки которого обрабатывается системой управления, после чего программно определяется зона регулирования. Угол положения рукоятки определяет интервалы запаздывания сигналов открытия и закрытия СПП, соответствующие определенной рабочей зоне и специально разработанному алгоритму для формирования последовательности управляющих сигналов, показанных на рис. 6.

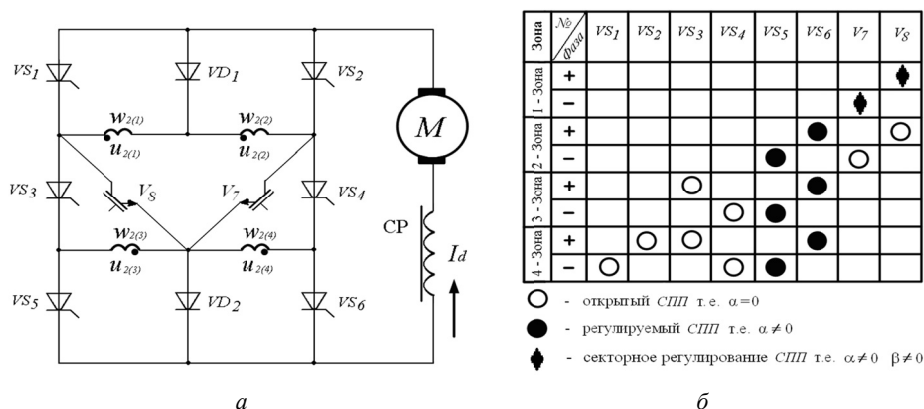


Рис. 6 – Усовершенствованный зонный выпрямитель лестничного типа:

a – схема силовой части; *б* – диаграмма управления СПП в зависимости от зоны регулирования

Fig. 6. An improved zone-phase rectifier:

a – is a power unit circuit; *b* – is a control diagram of semiconductor control depending on a regulation zone

Одним из наиболее сложных вопросов при осуществлении зонного регулирования является непостоянство уровня питающего напряжения ввиду динамического характера стохастических процессов, протекающих в системе электроснабжения, и нагрузки, подключенной к ней. Это делает проблематичным использование алгоритма с фиксированными временными рамками. В связи с этим была поставлена и решена задача обеспечения гибкости алгоритма управления СПП с учетом изменчивости параметров питающей сети однофазного переменного тока для эффективного и надежного соблюдения заданных машинистом показателей регулирования. В основе такого решения лежат подпрограммы, предусматривающие отслеживание фазовых сдвигов в питающей сети.

Принцип работы программы удобно рассмотреть на примере блок-схемы, представленной на рис. 7.

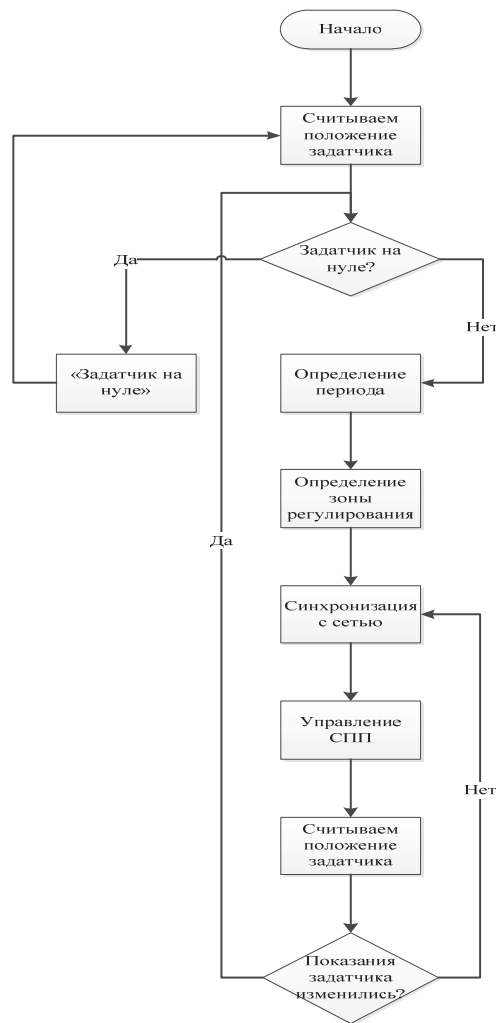


Рис. 7 – Блок-схема алгоритма управления

Fig. 7 – A flow chart of the control algorithm

Для проверки эффективности предложенных решений на кафедре ЭТК разработана физическая модель зонного выпрямителя.

2. Результаты работы системы управления

Наибольший интерес результаты экспериментов представляют на первой и второй зонах регулирования. На первой зоне реализуется секторное регулирование IGBT-транзисторов, что позволяет существенно увеличить коэффициент мощности выпрямителя, работающего в диапазоне малого входного напряжения [4]. На второй зоне выполняется переход к фазовому регулированию тиристорov при максимальном времени открытия транзисторов. Фазовое регулирование на третьей и четвертой зоне проходит по аналогии со второй, поэтому в данной работе не приводится. Результаты экспериментов представлены на рис. 8 и 9.

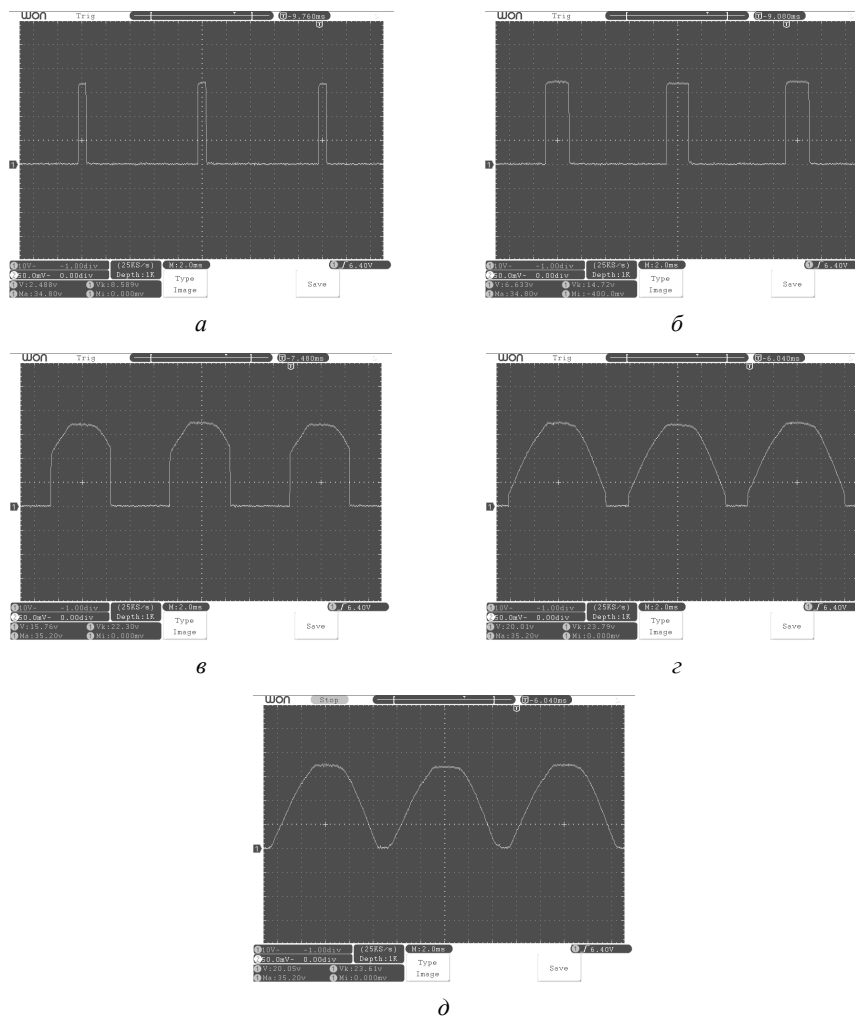


Рис. 8 – Работа выпрямителя в режиме секторного регулирования:

a – время открытия транзистора за полупериод – 12,5 %; b – время открытия транзистора за полупериод – 21 %; c – время открытия транзистора за полупериод – 54 %; e – время открытия транзистора за полупериод – 75 %; d – время открытия транзистора за полупериод – 100 %

Fig. 8 – A diagram of the rectifier output voltage (operation in the sector control mode):

α – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 12,5 %; $\bar{\alpha}$ – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 21 %; ϵ – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 54 %; $\bar{\epsilon}$ – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 75 %; δ – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 100 %

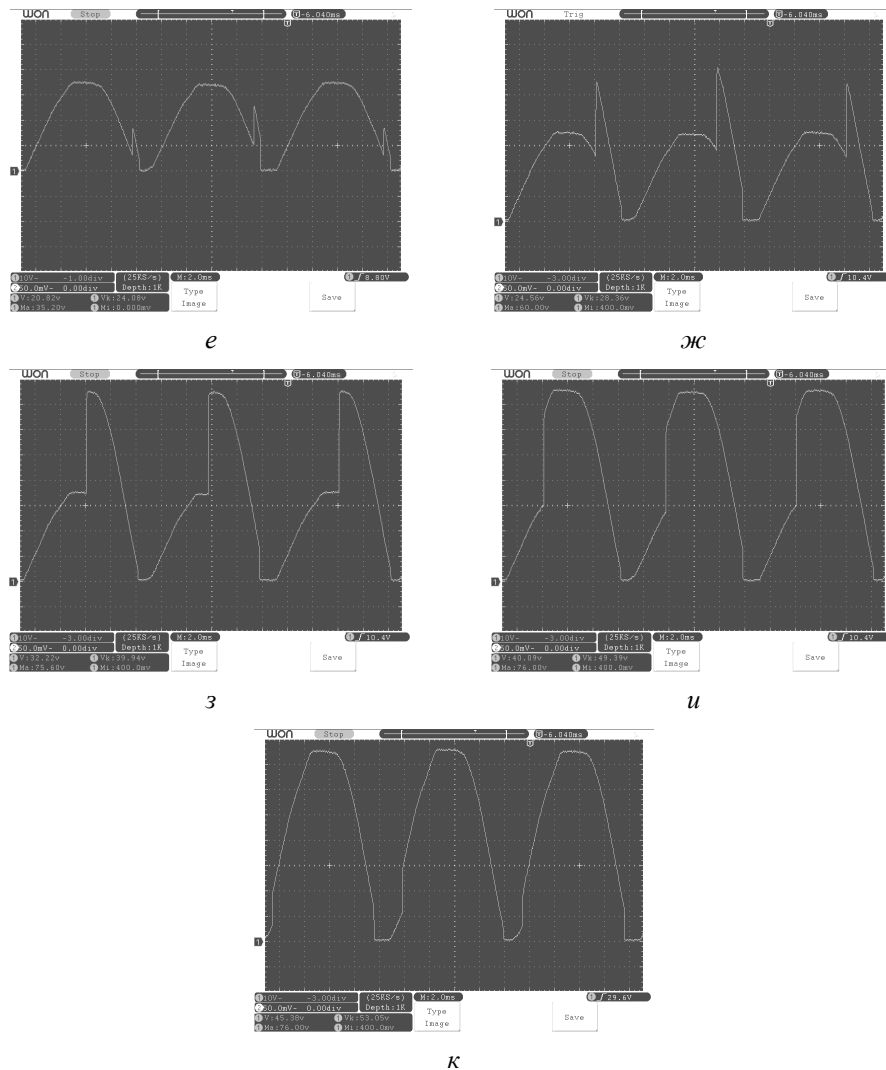


Рис. 9 – Работа выпрямителя в режиме фазового регулирования:

e – время открытия транзистора за полупериод – 100 %, угол открытия тиристоров 23° ; *ж* – время открытия транзистора за полупериод – 100 %, угол открытия тиристоров 45° ; *з* – время открытия транзистора за полупериод – 100 %, угол открытия тиристоров 92° ; *и* – время открытия транзистора за полупериод – 100 %, угол открытия тиристоров 128° ; *к* – время открытия транзистора за полупериод – 100 %, угол открытия тиристоров 167°

Fig. 9 – A diagram of rectifier output voltage (operation in the phase control mode):

e – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 100 %, the angle of thyristor in the on-mode is 23° ; *ж* – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 100 %, the angle of thyristor opening is 45° ; *з* – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 100 %, the angle of thyristor in the on-mode is 92° ; *и* – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 100 %, the angle of thyristor in the on-mode is 128° ; *к* – the time of transistor in the on-mode in the half-period is 100 %, the angle of thyristor in the on-mode is 167°

Результаты экспериментов подтвердили ожидаемый характер работы исследуемого выпрямителя. Он обеспечивает плавное регулирование средневых выпрямлен-

ного напряжения в зависимости от угла регулирования α и задаваемых алгоритмов управления вентилями и сохраняет устойчивую непрерывную работу при переходе с одной зоны на другую в условиях динамического характера изменения величины напряжения питающей сети переменного тока в пределах 10 %.

Заключение

Были достигнуты следующие задачи.

1. Создан алгоритм управления физической моделью выпрямителя.
2. По разработанному алгоритму написана программа для однокристального микроконтроллера.
3. Обеспечена согласованная работа системы путем разработки драйверов для СПП и детектора положения синусоиды.
4. Проведена проверка работоспособности системы управления и представлены ее результаты.

Таким образом, физическая модель усовершенствованного зонного выпрямителя лестничного типа, управляемая разработанной микропроцессорной системой управления, позволяет на практике проводить серии экспериментов по выявлению количественной, в отношении степени эффективности предложенного устройства, оценки энергетических показателей в различных режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов В.В., Мятаж 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.
2. **Алексеева И.К., Иванов В.В.** Разработка физической модели четырехзонного регулятора лестничного типа / науч. рук. С.В. Мятаж // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 1–5 декабря 2015 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 5. – С. 116–117.
3. **Капустин А.В., Иванов В.В.** Разработка микропроцессорной системы управления тиристорами в зонном выпрямителе / науч. рук. С.В. Мятаж // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 1–5 декабря 2015 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 5. – С. 141–142.
4. **Джаборов М.М., Мятаж С.В., Волкова О.Л.** Энергетические показатели четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 54–59.
5. **Плакс А.В.** Системы управления электрическим подвижным составом: учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
6. **Тихменев Б.Н., Кучумов В.А.** Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
7. **Евдокимов С.А., Щуров Н.И.** Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 423 с.
8. **Зиновьев Г.С.** Силовая электроника: монография. – М.: Юрайт, 2012. – 667 с.
9. **Dzhaborov M.M., Myatezh S.V., Ivanov V.V.** Research of four-zone converter in regenerative braking mode // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM'2014. – P. 101–105.
10. Основы электрического транспорта: учебник для вузов / под общ. ред. М.А. Слепцова. – М.: Академия, 2006. – 464 с.

DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR THE IMPROVED LADDER ZONE RECTIFIER

Kapustin A.V., Alekseeva I.K., Ivanov V.V., Myatezh S.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

As the title implies the article describes the development of a microprocessor control system of the power unit of the improved four-zone rectifier. Problems designed to improve its energy efficiency are stated and solved. The relevance of the problem is also validated. Much attention is paid to problems of operators' and equipment security. Optical isolation is proposed to achieve this goal. Driver circuits for thyristors and IGBT tranzistors are presented. Besides, the necessity of synchronization of the control system and network operation is proved, and the solution to this problem is also proposed. To better understand the system operation a programm for the microconotroller whose block diagram is described in the article was written. In conclusion, the results of zone-phase regulation are shown and goals for further research are set.

Keywords: Microprocessor system, zone-phase rectifier, optical galvanic isolation, synchronized network.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-4-70-79

REFERENCES

1. Ivanov V.V., Myatezh S.V. Puti povysheniya energeticheskikh pokazatelei zonnykh vypryamitelei [Ways of increasing energy indicators in zone recifiers]. *Nauchnyi potentsial studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoi oblasti* [Science potential of students and young scientists of Novosibirsk region]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014, pp. 72–74.
2. Alekseeva I.K., Ivanov V.V. [Physical model of four-zone ladder type regulator development]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technology. Innovation], Novosibirsk, 1–5 December 2015, pt. 5, pp. 116–117. (In Russian).
3. Kapustin A.V., Ivanov V.V. [Development of microprocessor control system for thyristors in zone recifier]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [Science. Technology. Innovation], Novosibirsk, 1–5 December 2015, pt. 5, pp. 141–142. (In Russian).
4. Dzhaborov M.M., Myatezh S.V., Volkova O.L. Energeticheskie pokazateli chetyrekhzon-nogo vypryamitelya s lestnichnoi strukturoi [Energy indicators of four-zone ladder type reci-fier]. *Elektrotehnika, elektromekhanika i elektrotekhnologii* [Electrotecal engineering, elec-tromechnica and electrotechnonlogy]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014, pp. 54–59.
5. Plaks A.V. *Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom* [Control systems of electric stock]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 360 p.
6. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. *Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobra-zovatelyami* [AC trains with thyristors converters]. Moscow, Transport Publ., 1988. 311 p.
7. Evdokimov S.A., Shchurov N.I. *Strukturnyi sintez mnogofaznykh ventil'nykh preobrazovate-lei* [Structural synthesis of multi-phase valve inverters]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2010. 423 p.
8. Zinov'ev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurait Publ., 2012. 667 p.
9. Dzhaborov M.M., Myatezh S.V., Ivanov V.V. Research of four-zone converter in regenera-tive braking mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698. Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM'2014, pp. 101–105.
10. Sleptsov M.A., ed. *Osnovy elektricheskogo transporta* [Fundamentals of electric transport]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 464 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Капустин Андрей Владимирович – родился в 1994 году, студент первого курса магистратуры Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электротехника, электроэнергетика. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kapusta_nsk@mail.ru).

Kapustin Andrey Vladimirovich (b. 1994) – a first-year master's student, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrical engineering and electric power engineering. He is the author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kapusta_nsk@mail.ru).



Алексеева Ирина Константиновна – родилась в 1995 году, студентка первого курса магистратуры Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электротехника, электроэнергетика. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, пр. К. Маркса, 20. E-mail: alekseeva1201@mail.ru).

Alekseeva Irina Konstantinovna (b. 1994) – a first-year master's student, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on electrical engineering and electric power engineering. She is the author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: alekseeva1201@mail.ru).



Иванов Владлен Владимирович – родился в 1992 году, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электротехника, электроэнергетика. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, пр. К. Маркса, 20. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru).

Ivanov Vladlen Vladimirovich (b. 1992) – a postgraduate student, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrical engineering and electric power engineering. He is the author of 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru).



Мятеж Сергей Владимирович – родился в 1975 году, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭТК Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электротехника, электроэнергетика. Опубликовано 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: serg_y_7578@mail.ru).

Myatezh Sergey Vladimirovich (b. 1975) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the ETK department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electrical engineering and electric power engineering. He is author of 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: serg_y_7578@mail.ru).

Статья поступила 16 сентября 2016 г.

Received September 16, 2016

To Reference:

Kapustin A.V., Alekseeva I.K., Ivanov V.V., Myatezh S.V. Razrabotka mikroprotsessornoj sistemy upravleniya usovershenstvovannym zonnym vypryamitelem lestnichnogo tipa [Development of a microprocessor control system for the improved ladder zone rectifier]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 4 (37), pp. 70–79. doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-70-79