

Разработка регулятора переменного напряжения

А.М. Кабышев, О.В. Лыков, М.П. Маслаков

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).

Аннотация: Актуальной научно-технической задачей является разработка преобразователей электрической энергии с высокими эксплуатационными и энергетическими характеристиками. Применение современных методов разработки и анализа схем силовой электроники, основанных на использовании средств компьютерной техники, позволяет успешно решать эту задачу. В данной статье разработана принципиальная схема регулятора переменного напряжения, в которой для управления силовым тиристорным ключом применяется система управления, выполненная на основе микроконтроллера, реализующего алгоритм импульсно-фазового регулирования величины переменного выходного напряжения. Система управления силовым тиристорным ключом синхронизирована с моментами перехода через ноль питающего напряжения синусоидальной формы. Схема регулятора адаптирована для компьютерного моделирования в среде программного продукта PROTEUS. В статье также разработана структурная схема и выполнена программная реализация на языке ассемблера алгоритма работы микроконтроллера. В результате компьютерного моделирования получены временные диаграммы напряжений на основных элементах схемы регулятора переменного напряжения. Временные диаграммы поясняют особенности электромагнитных процессов, протекающих в схеме регулятора. Результаты компьютерного моделирования, схема регулятора, разработанный алгоритм и программное обеспечение микроконтроллера могут найти применение при разработке преобразователей электрической энергии для систем автоматического управления электротехнологическим оборудованием.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, тиристорный регулятор, переменное напряжение, алгоритм работы микроконтроллера, временные диаграммы, транзисторный ключ, система управления, демпфирующая цепь, силовой тиристор, активно-индуктивная нагрузка.

В настоящее время регуляторы переменного напряжения широко применяются в системах электропитания технологических процессов, в которых требуется своевременное изменение и стабилизация величины переменного напряжения, прикладываемого к нагрузке.

Использование современных средств микропроцессорной техники в системах управления силовой частью схемы регулятора расширяет функциональные возможности преобразователей электрической энергии [1, 2] и позволяет разрабатывать системы для управления технологическим напряжением оборудования в автоматическом режиме.

Негативное влияние на качество электроэнергии оказывает процесс регулирования и стабилизации таких ее параметров, как ток и напряжение, ухудшается их гармонический состав [3-5]. Для улучшения качества электроэнергии в настоящее время находят применение фильтрокомпенсирующие устройства [5-7], а также ведутся исследования, направленные на улучшение энергетических характеристик преобразователей электрической энергии и уменьшения их влияния на питающую сеть за счет оптимизации схемотехнических решений [8, 9] и алгоритмов управления силовыми ключами [10, 11].

В состав современных регуляторов и стабилизаторов переменного напряжения входит блок силовых ключей и система управления.

В блоке силовых ключей преобразователей электрической энергии широко применяются полупроводниковые приборы, работающие в ключевом режиме, что обеспечивает преобразование электрической энергии с высоким значением коэффициента полезного действия.

В зависимости от схемы силового блока и типа силовых полупроводниковых ключей выбирается алгоритм работы системы управления ключами преобразователя электрической энергии. В настоящее время применяются следующие алгоритмы управления силовыми ключами: импульсно-фазовое управление с отстающим углом управления; импульсно-фазовое управление с опережающим углом управления; двустороннее импульсно-фазовое управление; высокочастотная импульсная модуляция [12, 13].

Импульсно-фазовое управление с отстающим углом управления широко применяется при использовании в качестве силовых ключей однооперационных тиристоров. При этом, угол управления отсчитывается от момента перехода синусоидального напряжения электросети через ноль.

На рис.1 показана, адаптированная для анализа электромагнитных процессов в среде программного продукта PROTEUS, принципиальная схема регулятора переменного напряжения, система управления которого реализует импульсно-фазовое управление силовым однооперационным тиристором.

Силовой блок регулятора выполнен по схеме, состоящей из однооперационного тиристора VD8 и диодного моста: VD1– VD4.

Регулятор переменного напряжения работает на активно-индуктивную нагрузку, функции которой выполняют элементы: R3, L1. Элементы R10, C4, VD9 образуют демпфирующую цепь, предотвращающую самопроизвольное включение тиристора VD8.

Электропитание силового блока осуществляется от источника напряжения синусоидальной формы, функции которого выполняет элемент V1. Резистор R1 учитывает внутреннее сопротивление источника электропитания V1. Конденсатор C1 служит для компенсации реактивной мощности, генерируемой регулятором переменного напряжения.

Включение тиристора VD8 происходит в моменты открывания фотосимистора, входящего в состав оптрона VD7, что обеспечивает протекание тока, ограниченного резистором R8, через управляющий электрод VD8. Закрывается тиристор VD8 в моменты времени, когда протекающий через него ток становится меньше тока удержания тиристора во включенном состоянии.

Оптрон VD7 также служит для гальванической развязки силового блока от системы управления.

Основным элементом системы управления является микроконтроллер DD1. В данной схеме применяется микроконтроллер PIC16F84A фирмы Microchip. Работа системы управления синхронизирована с работой сети электропитания (V1). В состав схемы синхронизации входят следующие узлы: V2 (в реальной схеме функции этого элемента выполняет одна из

вторичных обмоток трансформатора, входящего в состав блока, формирующего постоянное напряжение 5В (V3) для электропитания системы управления, на схеме рис.1 этот блок не показан); диодный мост VD5; транзисторный ключ, выполненный на основе транзистора VT1. Коллектор транзистора подключен к выводу RA1 микроконтроллера DD1.

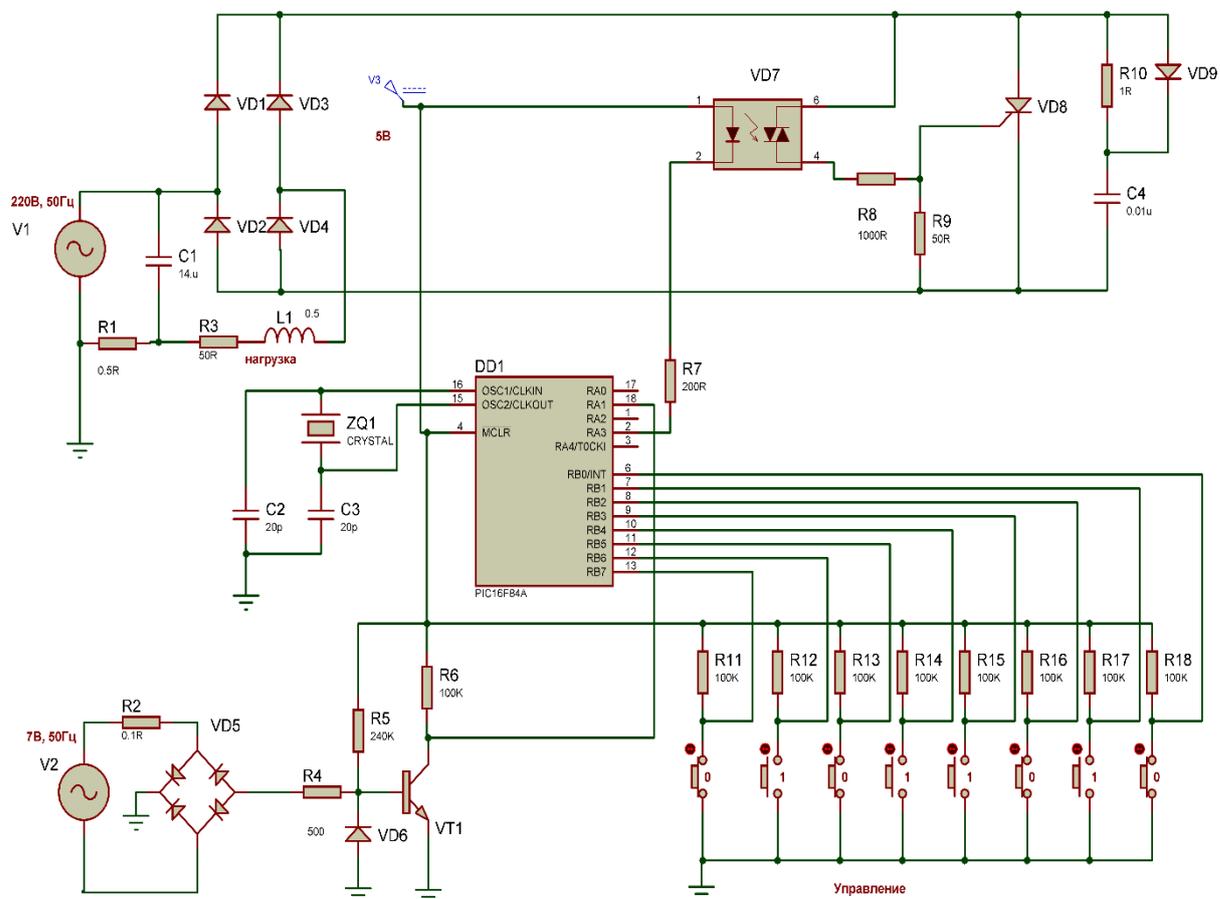


Рис. 1. – Тиристорный регулятор переменного напряжения

На рис.2 приведены временные диаграммы, поясняющие работу схемы синхронизации.

Здесь приведены диаграмма напряжения на выходе диодного моста VD5 и диаграмма напряжения на коллекторе транзистора VT1. Видно, что в момент снижения выпрямленного напряжения на выходе VD5 до нуля

открывается транзистор VT1 и на его коллекторе формируется сигнал низкого уровня (0В).

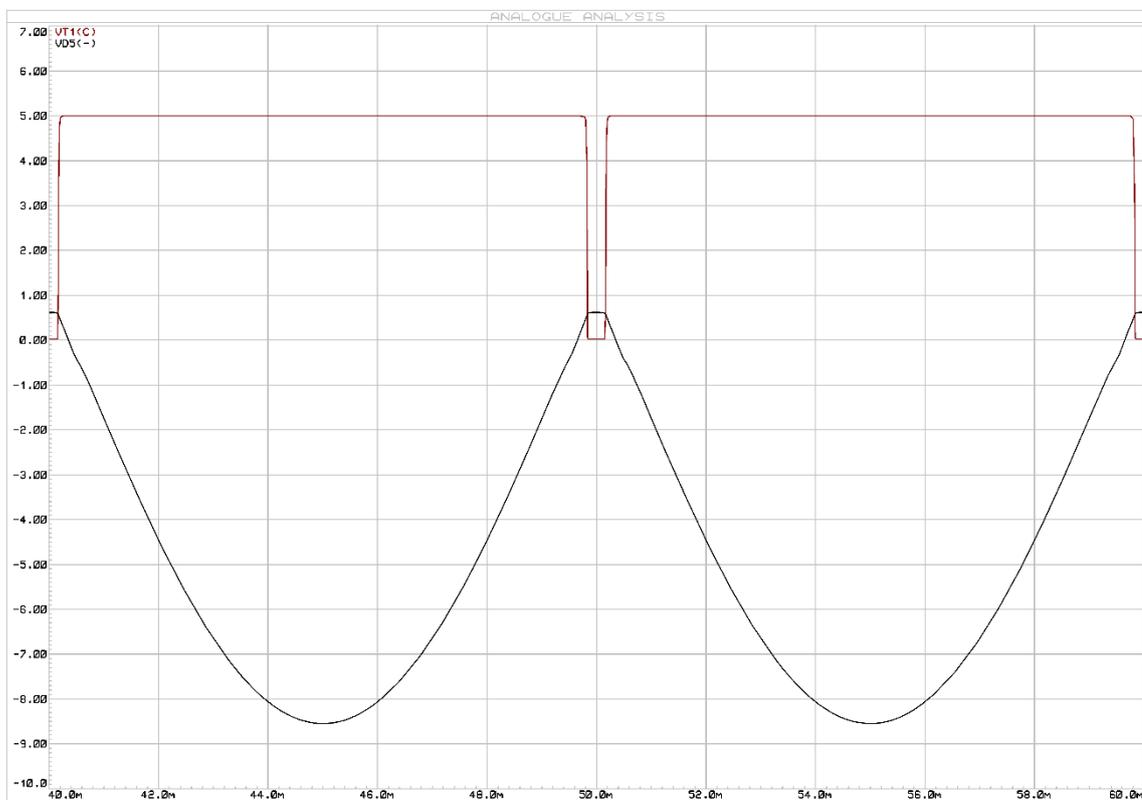


Рис. 2. – Временные диаграммы напряжений на элементах схемы синхронизации

Микросхема DD1 контролирует этот сигнал и формирует сигнал низкого уровня на выводе RA3, который «включает» светодиод оптрона VD7 (и как следствие тиристор VD8) в моменты времени, зависящие от величины угла управления, задаваемого клавишами клавиатуры «Управление», подключенной к выводам RB микроконтроллера.

На рис.1 показано состояние клавиш клавиатуры, при котором на выводы RB микроконтроллера поступает двоичный код: 0101 1010 В, соответствующий числу 90 в десятичной системе счисления. Таким образом, система управления будет обеспечивать работу силового блока регулятора с

углом управления равным 90 эл. град., отсчитываемым от момента перехода через ноль синусоидального напряжения питающей сети.

Такому режиму работы системы управления соответствует, показанная на рис.3, временная диаграмма напряжения на активно-индуктивной нагрузке регулятора переменного напряжения (рис.1).

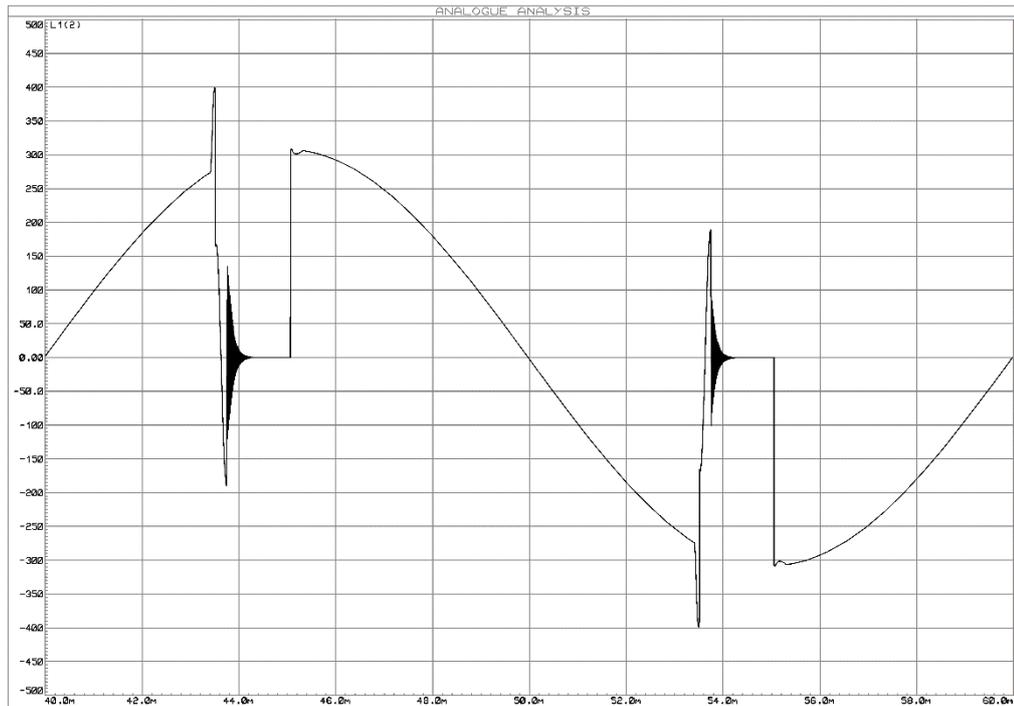


Рис. 3. – Диаграмма напряжения на нагрузке

Изменяя значение кода, набранного на клавиатуре «Управление» можно изменять величину угла управления тиристором VD8 и величину действующего значения напряжения на нагрузке регулятора (рис.3).

В автоматизированных системах управления технологическим оборудованием, код, задающий величину угла управления и величину напряжения на нагрузке, может поступать в схему рис.1 не только от клавиатуры «Управление», но и дистанционно из других внешних систем цифровой обработки информации, при их соответствующем подключении к выводам RB микроконтроллера.

Для обеспечения работы схемы по описанному выше принципу был разработан, показанный на рис.4, алгоритм работы микроконтроллера DD1.

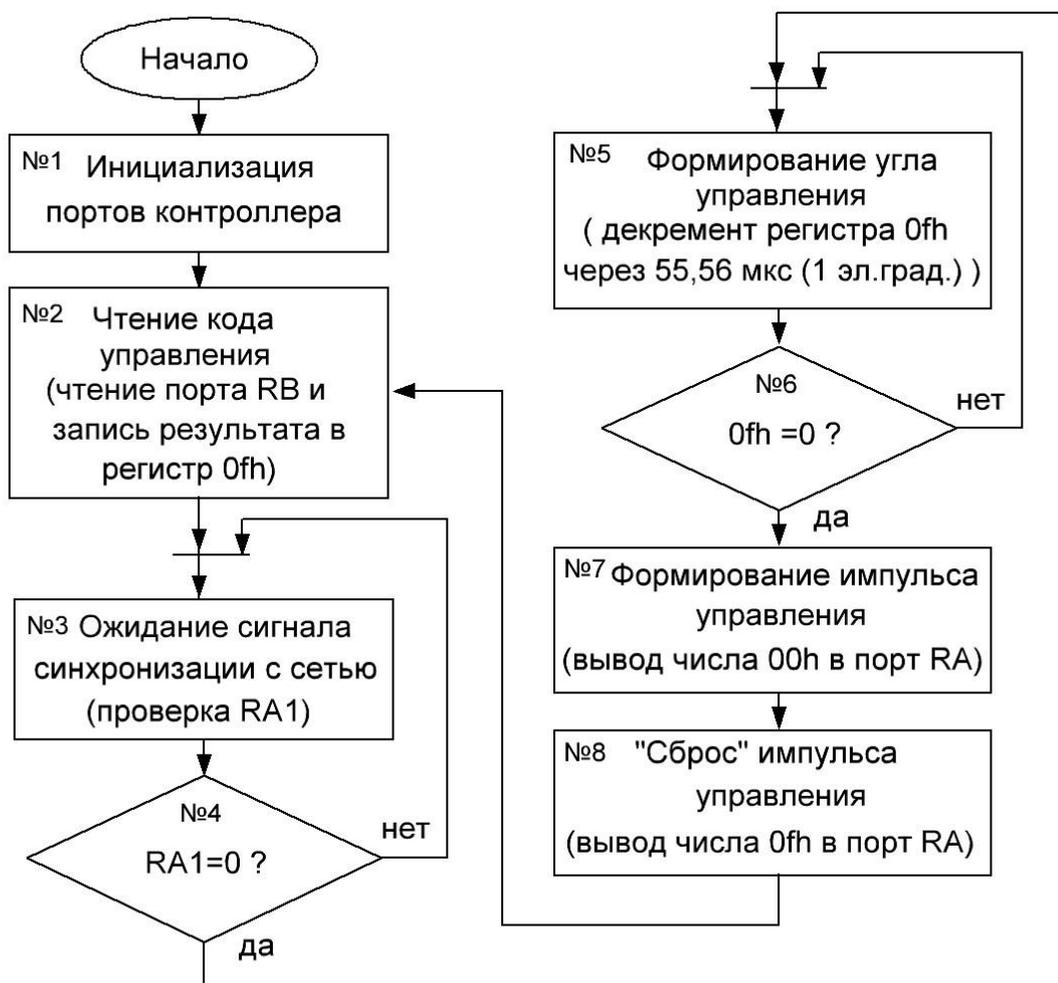


Рис. 4. – Алгоритм работы микроконтроллера

В блоке №1 алгоритма осуществляется настройка выводов портов микроконтроллера: все выводы RB и вывод RA1 настраиваются на прием информации, а RA3 должен быть настроен на вывод информации из микроконтроллера для управления работой светодиода, входящего в состав VD7. В блоке №2 микроконтроллер принимает код, набранный на клавиатуре, и заносит его в регистр общего назначения 0fh. В блоках №3, №4 микроконтроллер DD1 проверяет состояние вывода RA1, что позволяет

синхронизировать работу системы управления с питающей сетью. В блоках №5 и №6 формируется временной интервал длительностью 1 эл. град., который используется для последовательного отсчета содержимого регистра 0fh до нуля, происходит формирование заданного угла управления. В блоках №7, №8 выполняется формирование короткого импульса управления тиристором VD8.

Ниже приведен текст программы, реализующей рассмотренный алгоритм. В текст введены комментарии, разбивающие его на блоки в соответствии с алгоритмом, показанным на рис.4.

Текст ассемблер программы:

```
; Инициализация портов контроллера
    bsf status, 5h
    movlw 07h
    movwf trisa
    movlw 0ffh
    movwf trisb
    bcf status, 5h
; Чтение кода управления
m1:  movf portb, 0
    movwf 0fh
; Ожидание сигнала синхронизации с
    сетью
m10: btfsc porta, 1
    goto m10
; Формирование угла управления
m6:  movlw 12h
    movwf 0dh
m5:  decfsz 0dh, 1
    goto m5
    decfsz 0fh, 1
    goto m6
; Формирование импульса управления
    movlw 00h
    movwf porta
    movlw 9fh
    movwf 0eh
m7:  decfsz 0eh, 1
    goto m7
; «Сброс» импульса управления
    movlw 0fh
    movwf porta
    goto m1
```

Результаты, полученные в данной статье: схема регулятора переменного напряжения, алгоритм и программное обеспечение микроконтроллера, результаты компьютерного моделирования предназначены для анализа протекающих в схеме электромагнитных процессов и для оптимизации параметров преобразователя электрической энергии. Результаты работы могут найти применение при разработке преобразователей электрической энергии, выполненных на основе регулятора переменного напряжения, для систем управления

электротехнологическим оборудованием, работающим в автоматическом режиме.

Литература

1. Мелешин В., Овчинников Д. Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных выпрямителей // Силовая электроника. 2005. №4. С. 50-53.
2. Удовиченко А.В., Сидоров А.В., Бештинов А.О. Регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами и цифровой системой управления // Доклады АН ВШ РФ. Технические науки. 2018. №2(39). С. 93-105.
3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
4. Греков Э.Л., Филимонов С.И. Влияние фильтрокомпенсирующего устройства на аварийные режимы работы тиристорного преобразователя в карьерных электрических экскаваторах // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2 (23). С. 28-32.
5. Tenti, P., P. Mattavelli and E. Tedeschi, 2007. Compensation Techniques Based on Reactive Power Conservation. Electrical Power Quality and Utilization, Journal, Vol. XIII, No.1: 17-24.
6. Иванова Н.А., Прохоренко Е.В., Черепанский В.Н. Создание и исследование имитационной модели динамического компенсатора искажения напряжения // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4569/.
7. Kaniewski, J., P. Szczesniak, M. Jarnut and G. Benysek, 2015. Hybrid Voltage Sag/Swell Compensators: A Review of Hybrid AC/AC Converters. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, No. 4: 37-48.
8. Брылина О.Г. Многозонный интегрирующий регулятор переменного напряжения, работающий при перегрузках по току // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2 (23). С. 19-20.

9. Makky, A.M., N.A. Ahmed and E.H. El- Zohri, 2003. Supply power factor improvement with single-phase AC voltage converter. IEEE, Conf. Proc., IEMDC'03 (issue vol. 2), Madison, Wisconsin USA, pp: 863 –868.

10. Титов В.Г., Плехов А.С., Бинда К.А., Титов Д.Ю. Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909/.

11. Титов В.Г., Плехов А.С., Бинда К.А., Титов Д.Ю. Итерационный алгоритм оптимального управления компенсационными преобразователями // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1927/.

12. Кабышев О.А., Кабышев А.М. Разработка и компьютерное моделирование регулятора переменного напряжения // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5683.

13. Обухов А.Е. Бестрансформаторные повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения в электротехнических системах кондиционирования качества электрической энергии: дис. ... канд техн. наук: 05.09.03. Новосибирск, 2003. 207 с.

References

1. Meleshin V., Ovchinnikov D. Silovaya elektronika. 2005. №4. pp.50-53.
2. Udovichenko A.V., Sidorov A.V., Beshtinov A.O. Doklady AN VSH RF. Tekhnicheskkiye nauki. 2018. №2(39). pp. 93-105.
3. Zhezhelenko I. V. Vysshiye garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. [Higher harmonics in the power supply systems of industrial enterprises]. M.: Energoatomizdat, 2010. 375 p.

4. Grekov E.L., Filimonov S.I. Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. 2014. №2 (23). pp. 28-32.
5. Tenti, P., P. Mattavelli and E. Tedeschi, 2007. Electrical Power Quality and Utilization, Journal, Vol. XIII, No.1: 17-24.
6. Ivanova N.A., Prokhorenko E.V., Cherepanskiy V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4569/.
7. Kaniewski, J., P. Szczesniak, M. Jarnut and G. Benysek, 2015. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 9, No. 4: 37-48.
8. Brylina O.G. Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. 2014. №2 (23). pp. 19-20.
9. Makky, A.M., N.A. Ahmed and E.H. El- Zohri, 2003. IEEE, Conf. Proc., IEMDC'03 (issue vol. 2), Madison, Wisconsin USA, pp: 863 –868.
10. Titov V.G., Plekhov A.S., Binda K.A., Titov D.YU. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909/.
11. Titov V.G., Plekhov A.S., Binda K.A., Titov D.YU. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1927/.
12. Kabyshev O.A., Kabyshev A.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5683.
13. Obukhov A.E. Bestransformatornyye povyshayushche-ponizhayushchiye regulatory peremennogo napryazheniya v elektrotekhnicheskikh sistemakh konditsionirovaniya kachestva elektricheskoy energii. [Transformer-free step-up and step-down regulators of alternating voltage in electrical energy quality conditioning systems]: dis. ... kand tekhn. nauk: 05.09.03. Novosibirsk, 2003. 207 p.