УДК 621.314 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.143.2014.79067

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РЕКУПЕРАЦИИ АКТИВНОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Д-р техн. наук Я.В. Щербак, асп. А.А. Плахтий

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ РЕКУПЕРАЦІЇ АКТИВНОГО ТРИФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З КОРЕКЦІЄЮ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

Д-р техн. наук Я.В. Щербак, асп. О.А. Плахтий

RESEARCH OF THREE-PHASE ACTIVE RECTIFIERS WITH POWER FACTOR CORRECTION IN REGENERATIVE MODE

Proff. Scherback Y.V., PhD student A.A.Plakhtiy

В статье предложена система управления активного трехфазного выпрямителя, реализующая коэффициент мощности близкий к единице. Коррекция коэффициента мощности достигается как в режиме активного выпрямления, так и в режиме рекуперации. В программном пакете Matlab R2012 проведено моделирование работы активного выпрямителя с предложенной системой управления, а также выполнено исследование качества энергии. Предложенная система управления реализует рекуперацию с высокими энергетическими показателями.

***Ключевые слова**: рекуперация, трехфазный активный повышающий выпрямитель, коррекция коэффициента мощности.*

У статті подано систему управління активного трифазного випрямляча, яка реалізує коефіцієнт потужності близький до одиниці. Корекція коефіцієнта потужності реалізується як у режимі активного випрямляча, так і в режимі рекуперації. Виконано дослідження процесів в активному випрямлячі у програмному пакеті Matlab R2012 та виконано аналіз якості енергії. Запропонована система управління реалізує режим рекуперації з високими енергетичними показниками.

***Ключові слова**: рекуперація, трифазний активний підвищуючий випрямляч, корекція коефіцієнта потужності.*

One of promising areas of energy efficiency in railway transport is application of four-quadrant AC/DC converter with high power factor on the traction substations. The thyristor and diode three-phase

rectifiers, which used on the AC/DC traction substations, have a number of drawbacks. In some cases, they do not provide the ability to recover energy, but also they are powerful source of current harmonic for general industrial electric grid. The presence of higher harmonics in power grid has the following negative consequences: distortion of the supply voltage; pickup in telecommunication and control circuits; heating and additional losses in transformers and electrical machines, which are powered from the power supply system; reducing the efficiency of the power supply system and technical devices.

This article provides an overview of four-quadrant power conversion of active rectifier. This scheme allow implementation the following options: power factor correction, sinusoidal input current, eliminating harmonic in input current, regulation of the output voltage of the rectifier, energy recovery in the network. The article presents the optimal control scheme for three-phase four-quadrant AC/DC converter.

***Keywords**: four-quadrant power conversion, three-phase active boost rectifier, power factor correction.*

Введение. Одним из перспективных направлений энергосбережения на железнодорожном транспорте является применение рекуперативного торможения. При этом является актуальной задача реализации процесса рекуперации электрической энергии тяговой подстанцией постоянного тока. Применяемые в настоящее время на тяговых подстанциях преобразовательные установки не обеспечивают требуемое качество электрической энергии, возвращаемой в сеть переменного тока. Связано это с достаточно большой величиной реактивной мощности и высоким содержанием высших гармоник. Данное обстоятельство ставит задачу поиска путей совершенствования преобразовательных установок, реализующих рекуперацию.

Анализ последних исследований. Результаты исследований систем электроснабжения в режиме рекуперации с использованием тиристорных преобразователей достаточно полно освещены в работах [1, 2, 3]. Современный уровень развития силовой электроники позволяет реализовать высокоэффективные системы преобразования электрической энергии. Так, применение активных выпрямителей (АВ) [5, 6] позволяет повысить коэффициент мощности практически до единицы при прямом преобразовании электрической энергии. Но при этом остается не до конца решенной проблема работы таких преобразователей в режиме рекуперации.

Целью данной работы является создание и исследование системы управления активным выпрямителем, реализующей высокое качество электрической энергии в режиме рекуперации.

1. Топология рекуперирующего активного выпрямителя. Существуют различные топологии схем АВ, обеспечивающие коррекцию коэффициента мощности [5, 6]. Однако стоит отметить, что не все топологии АВ позволяют реализовывать двунаправленную передачу энергии. Ни схема Виена-выпрямителя, ни одноключевые трехфазные выпрямители не реализуют рекуперацию. Оптимальной схемой для реализации рекуперации является схема активного трехфазного повышающего выпрямителя. Схема позволяет осуществлять регулирование выходного напряжения в режиме активного выпрямителя, а также близкий к единице коэффициент мощности как в режиме активного выпрямления, так и в режиме рекуперации. Схема активного повышающего выпрямителя представлена на рис. 1.

2. Система управления активного выпрямителя. В работах [5, 6] рассмотрены различные системы управления (СУ) активным повышающим выпрямителем с коррекцией коэффициента мощности. Наиболее перспективными системами управления АВ являются гистерезисная СУ, векторная СУ и система прямого управления мощностью. Значительным преимуществом гистерезисной системы управления является ее относительная простота реализации, высокая надежность, высокий реализуемый коэффициент мощности. Структура гистерезисной системы управления представлена в работе [6].

Недостатком гистерезисной СУ является невозможность реализации процесса рекуперации. В работе предлагается система управления АВ, реализующая рекуперацию с высоким коэффициентом мощности. Предложенная система управления представлена на рис. 2.

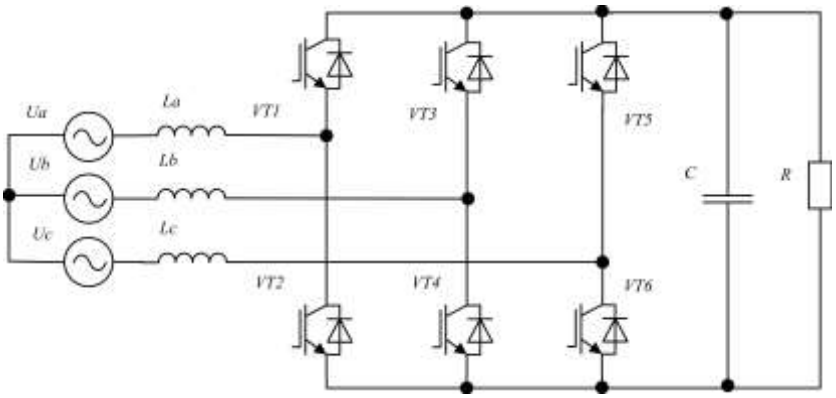

Рис. 1. Схема активного трехфазного повышающего выпрямителя

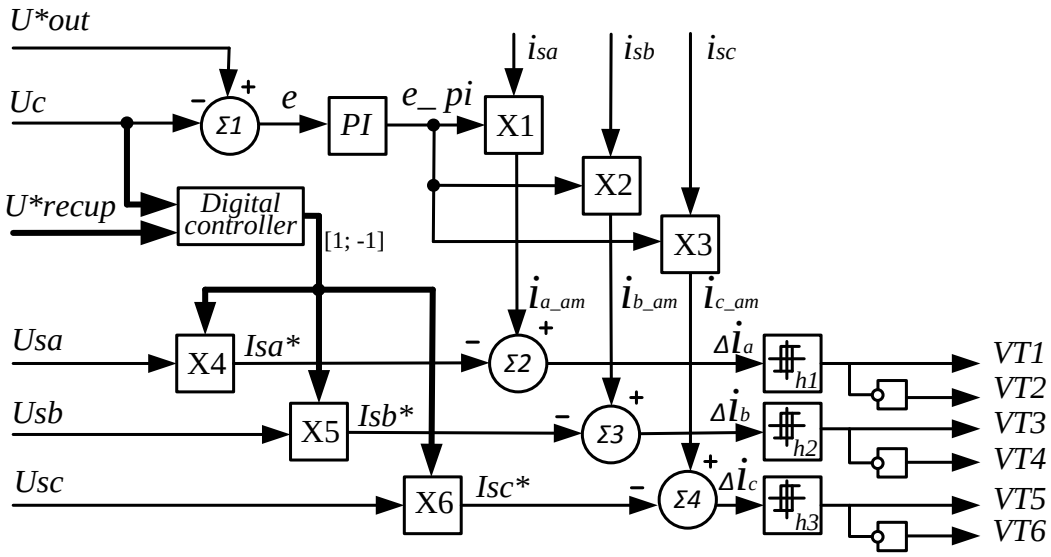

Рис. 2. Предложенная система управления АВ:
Uc – выходное напряжение активного выпрямителя; U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} – мгновенные значения фазных напряжений АВ; I_{sa}*, I_{sb}*, I_{sc}* – сигнал задания формы фазных токов АВ; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – мгновенные значения фазных токов АВ; i_{a_am}, i_{b_am}, i_{c_am} – масштабируемые мгновенные значения фазных токов АВ; Δi_a, Δi_b, Δi_c – сигналы рассогласования фазных токов; *U*out* – сигнал задания уровня выходного напряжения АВ; *U*recup* – сигнал задания уровня выходного напряжения, при котором АВ входит в режим рекуперации

Описание процессов в предложенной СУ

Регулирование выходного напряжения. Сигнал выходного напряжения *Uc* и сигнал задания выходного напряжения *U*out* подаются на сумматор Σ1. Сигнал ошибки *e* подается на PI регулятор. Выходной сигнал ПИ-регулятора *e_PI* и сигналы фазных токов i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} подаются на умножители X1, X2, X3. Выходные сигналы умножителей i_{a_am}, i_{b_am}, i_{c_am} повторяют форму фазных токов, однако с заданной амплитудой, необходимой для поддержания заданного уровня выходного напряжения *U*out*.

Канал выбора режима работы АВ. Канал обозначен на рис. 2 жирными линиями. Переход из режима выпрямления в режим рекуперации и обратно достигается с помощью блока цифрового контроллера. На цифровой контроллер подаются сигналы выходного напряжения АВ (*Uc*) и сигнал задания уровня рекуперации (*U*recup*). В случае *Uc>U*recup* на выходе контроллера будет сигнал равный

единице. При этом сигналы фазных напряжений U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} на умножителях X4, X5, X6 умножаются на единицу (т.е. не меняются). Вследствие этого сигналы задания формы фазных токов активного выпрямителя I_{sa}*, I_{sb}*, I_{sc}* будут синфазными с фазными напряжениями U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}. При этом АВ работает в режиме активного выпрямления.

Если же $U^*recup>Uc$, на выходе контроллера будет отрицательный сигнал равный -1. Вследствие этого на умножителях X4, X5, X6 сигналы задания формы фазных токов активного выпрямителя I_{sa}*, I_{sb}*, I_{sc}* будут в противофазе фазным напряжениям U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} , что переводит АВ в режим рекуперации.

Реализация синусоидальной формы фазного тока. Сигналы задания формы фазных токов активного выпрямителя I_{sa}*, I_{sb}*, I_{sc}* и масштабируемые мгновенные значения фазных токов АВ i_{a_am}, i_{b_am}, i_{c_am} подаются на умножители Σ2, Σ3, Σ4. Сигналы Δi_a, Δi_b, Δi_c представляют сигналы рассогласования фазных токов, т. е. фактическое отклонение мгновенного значения фазного тока от его сигнала задания.

Сигналы рассогласования токов фаз Δi_a, Δi_b, Δi_c подаются на гистерезисные распределители импульсов *h1*, *h2*, *h3*. Гистерезисные распределители имеют заданную величину гистерезиса, которая фактически формирует синусоидальную форму фазного тока.

На примере фазы А: если $i_{a_am} - Isa^* = \Delta i_a > (hyst/2)$ (т. е. фактический ток выше заданного значения), то с *h1* на ключ VT1 подается сигнал открытия (на VT2 – сигнал закрытия), при этом ток фазы А падает. Когда ток уменьшится ниже величины гистерезиса, при котором $\Delta i_a < -hyst/2$ (т. е. фактический ток ниже заданного значения), то на ключ VT1 подается сигнал закрытия (на VT2 – сигнал открытия), при этом ток фазы А растет. Таким образом, при задании достаточно малой величины гистерезиса форма фазного тока будет синфазна с напряжением и практически иметь синусоидальную форму. Фазы В и С имеют идентичный принцип управления. Графически принцип управления приведен на рис. 3.

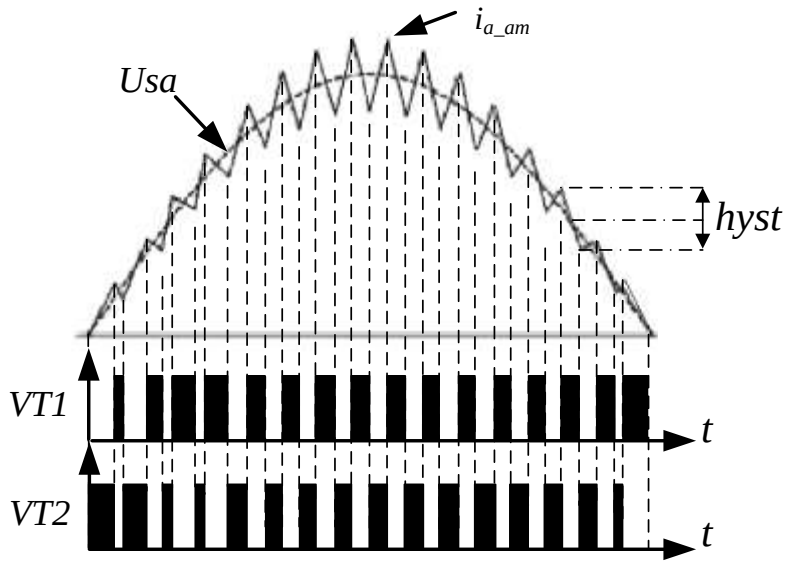

Рис. 3. Форма напряжения и тока фазы А; сигнал управления на ключ VT1

3. Моделирование работы предложенной системы управления активного выпрямителя. В программном пакете Matlab R2011 была построена модель АВ с предложенной системой управления (см. рис. 4). Выполнено моделирование АВ при динамическом переходе из режима активного выпрямления в режим рекуперации. Измерен коэффициент гармонических искажений токов,

реализуемый коэффициент мощности активного выпрямителя.

Моделируемая система управления АВ регулирует выходное напряжение в диапазоне от 2500 до 4000 В. Переход в режим рекуперации осуществляется при достижении выходного напряжения уровня 4500 В в результате перевода нагрузки из режима двигателя в режим генератора. При этом контур обратной связи выходного напряжения осуществляет инверсию сигнала задания фазного напряжения.

На рис. 5 приведены осциллограммы выходного напряжения АВ и формы фазных токов и напряжений АВ при переходе из режима активного выпрямителя в режим рекуперации.

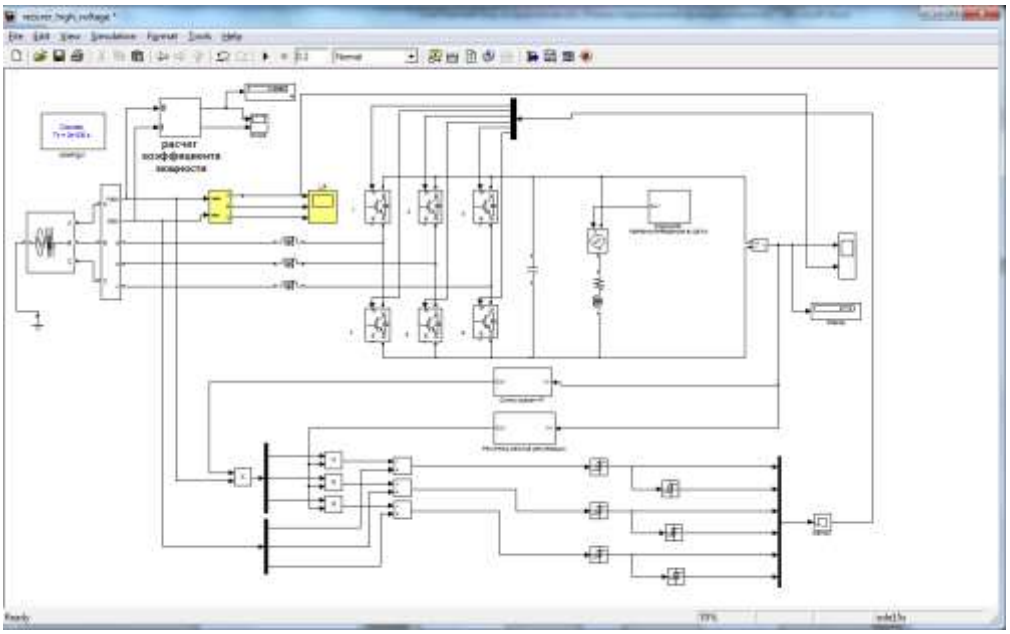

Рис. 4. Модель Matlab АВ с системой управления, реализующей рекуперацию энергии в сеть

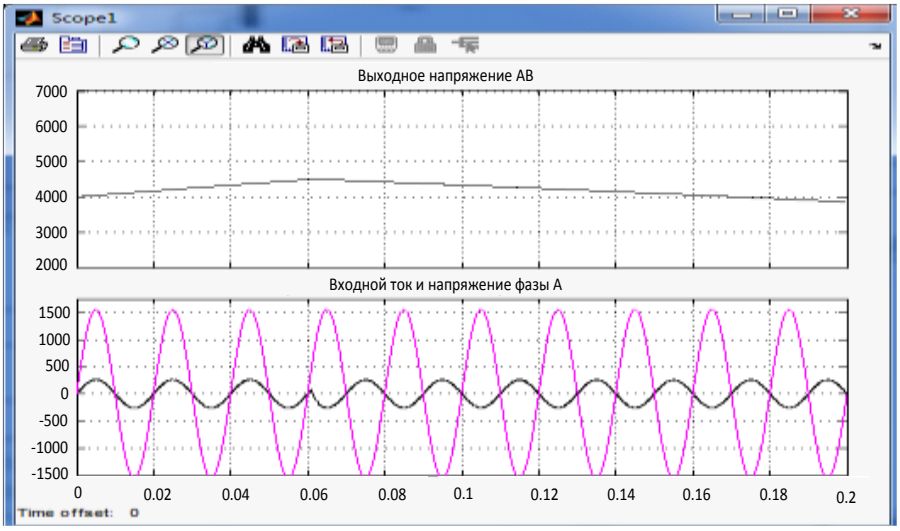

Рис. 5. Напряжения и токи фаз активного выпрямителя при переходе из режима активного выпрямителя в режим рекуперации

Как видно из рис. 6, предложенная система управления АВ реализует форму фазных токов, близкую к синусоиде, и cos(φ), близкий к единице, как в режиме активного выпрямления, так и в режиме рекуперации. На рис. 6 приведен Фурье-анализ формы фазного тока при питании АВ в режиме активного выпрямителя. На рис. 7 приведен Фурье-анализ формы рекуперируемого тока.

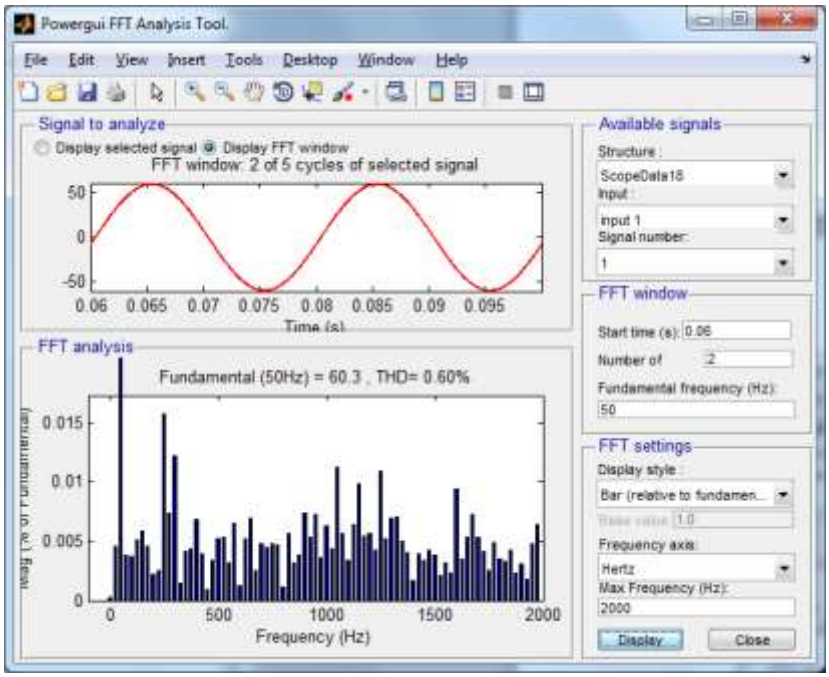

Рис. 6. Фурье-анализ формы входных токов (режим активного выпрямителя)

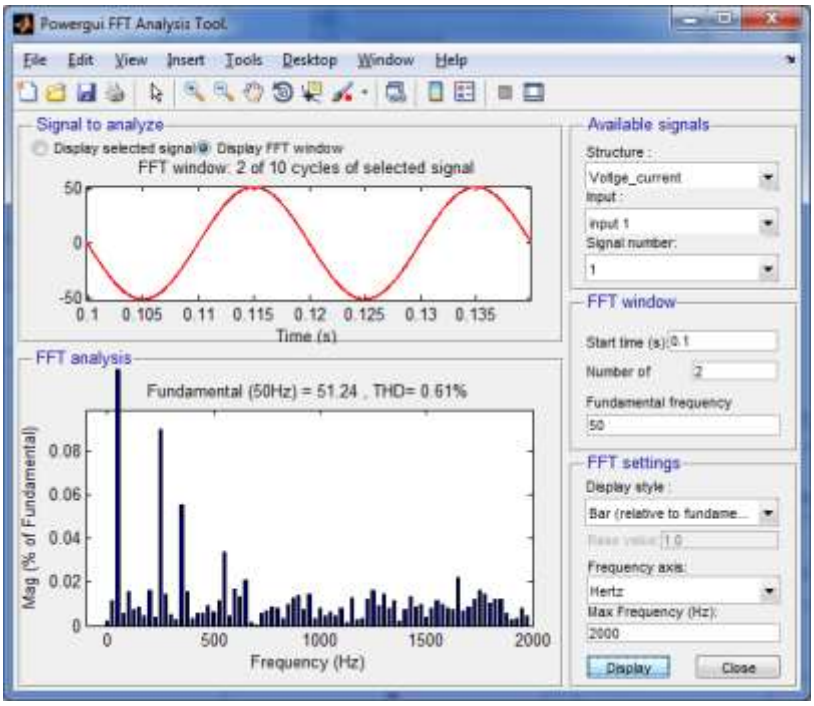

Рис. 7. Фурье-анализ формы фазных токов АВ при работе в режиме рекуперации

Проведенное моделирование дало следующие результаты. Энергетические показатели в режиме активного выпрямителя:

- коэффициент мощности равен PF = 99,98 %;
- коэффициент гармонических искажений фазных токов равен THD=0,60 %.

Энергетические показатели в режиме рекуперации:

- коэффициент мощности равен PF = -99,98 %;
- коэффициент гармонических искажений фазного тока равен THD=0,61 %.

Вывод. Разработанная система управления активного трехфазного повышающего выпрямителя позволяет реализовать режимы активного выпрямления и рекуперации с высокими энергетическими показателями. Результаты моделирования разработанной системы управления активным выпрямителем подтверждают возможность реализации режимов активного выпрямителя и режима рекуперации с коэффициентом мощности близким к единице.

Список использованных источников

1. Бродский, Ю.А. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии [Текст] / Ю.А. Бродский, А.И. Подаруев, В.Н. Пупынин, М.В. Шевелюгин // Электротехника. – 2008. – №7.– С. 38-41.
2. Кучумов, В.А. Рекуперация электроэнергии: достижения и резервы [Текст] / В.А. Кучумов, Б.Н. Ребрик // Железнодорожный транспорт. – 2002. – №11. – С. 14-22.
3. Носов, В.И. Эффективность рекуперации можно повысить: опыт Западно-Сибирской дороги [Текст] / В.И. Носов // Локомотив. – 2004. – № 1. – С. 65-72.
4. Шиллер, В.Г. Эффективность и надежность рекуперации на электрифицированных дорогах постоянного тока [Текст] / В.Г. Шиллер // Труды ВНИИЖТ. – 1965. – № 2. – С. 148-154.
5. Казачковский, Н.Н., Управление активным выпрямителем с релейно-векторным контуром тока для систем частотно-регулируемого электропривода [Текст] / Н.Н. Казачковский // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. праць. — Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – Ч. 2. – С. 40-43.
6. Mao, H. Analysis and Design of a High Frequency Three-Phase Boost Rectifier [Текст] / H. Mao, D. Boroyevich, A. Ravindra, F. Lee // IEEE Applied Power Electronics Conference, 1996 Record. – P. 538-544.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Ю.И.Гусевский

Щербак Яків Васильович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих систем електротранспорту Української державної академії залізничного транспорту. Телефон: +38 096 220 89 96; E-mail: Sherbak47@mail.ru
Плахтій Олександр Андрійович, аспірант кафедри автоматизованих систем електротранспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-73. E-mail: 83et@mail.ru

Scherback Yakov Vasilivich, Professor department of automated electric transport systems Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-73. E-mail: Sherbak47@mail.ru
Plakhtiy Alexandr Andrievich, Phd student department of automated electric transport systems Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-73. E-mail: 83et@mail.ru