

На правах рукописи



Удовиченко Алексей Вячеславович

РЕГУЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С УЛУЧШЕННОЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬЮ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Зиновьев Геннадий Степанович

Официальные оппоненты: Гарганеев Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий кафедрой Электромеханических комплексов и материалов

Стенников Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, ООО «Ольдам», главный инженер

Ведущая организация: Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирская государственная Академия водного транспорта», г. Новосибирск

Защита состоится «28» ноября 2013 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » октября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Потребность в стабилизации, регулировании, улучшении качества переменного напряжения актуальна для всех сетей переменного тока и особенно для “умных” сетей, что требует создания соответствующих конверторов силовой электроники на базе автономных инверторов напряжения или инверторов тока. Но подобные конверторы нуждаются в применении громоздких, дорогих реактивных элементов в виде электролитических конденсаторов или реакторов соответственно. К тому же наличие в конверторе внутреннего звена постоянного напряжения или тока обостряет проблемы с ликвидацией аварийных режимов в этих звеньях.

Проблема улучшения качества электрической энергии (КЭЭ) остро стоит в разработке устройств, повышающих КЭЭ, к которым можно отнести компенсаторы реактивной мощности, активные фильтры, компенсаторы провалов напряжения, несимметрии, фликера и устройства мягкого пуска асинхронных и синхронных двигателей, особенно высоковольтных. Что актуально из-за больших пусковых токов двигателей, приводящих к глубоким провалам напряжения питающей сети. Распространенные тиристорные устройства плавного пуска двигателей переменного напряжения хотя и уменьшают в 2-3 раза пусковой ток двигателей, но существенно портят его форму и создают дополнительную реактивную составляющую тока, обусловленную фазовым регулированием напряжения посредством угла задержки включения тиристоров. Это обстоятельство снижает входной коэффициент мощности пускового устройства и увеличивает потери активной мощности в двигателе.

Известные типовые устройства плавного пуска асинхронных двигателей, содержащие встречно-параллельные тиристоры в каждой фазе, характеризуются двумя принципиальными особенностями. Во-первых, пониженными энергетическими показателями во время пуска, что связано с несинусоидальностью форм выходных напряжений и выходных и входных токов, а также с наличием сдвига фазы тока относительно напряжения, увеличивающегося по мере регулирования вниз выходного напряжения. Во-вторых, ограниченным сверху единицей коэффициентом преобразования по напряжению, не позволяя сохранять номинальное напряжение на выходе регулятора при снижении входного напряжения.

Альтернативные решения указанных проблем “умных” сетей основываются на других типах конверторов, а именно на АС-АС конверторах, как то регуляторах переменного напряжения, циклоконверторах, матричных конверторах. На базе этих конверторов естественным образом выполняются регуляторы и стабилизаторы переменного напряжения, регуляторы реактивной мощности, активные фильтры гармоник, компенсаторы провалов в кривой напряжения, симметрирующие устройства в многофазных сетях и т. п. Причем все эти конверторы являются однокаскадными и соответственно не содержат внутри себя звена постоянного тока с большими реактивными накопительными элементами.

Большой вклад в исследование и разработку регуляторов переменного напряжения внесли – М.В. Гельман, В.В. Голубев, В.Ф. Дмитриков, Б.К. Жарский, Г.С. Зиновьев, А.В. Кобзев, В.С. Копырин, К.А. Липковский, С.П. Лохов, Г.Я. Михальченко, Г.С. Мыцык, А.Е. Обухов, В.И. Попов, Ю.К. Розанов, А.В. Тараскин, P.P.J. van den Bosch, L. Chen, D. Divan, M. Dumitrescu, P.N. Enjeti, D. Floricau, N.H.M. Hofmeester, S. Ivanov, J.B. Klaassens, O.C. Montero-Hernandez, F.Z. Peng, I. Popa, A. Prasai, S. Srinivasan, G. Venkataramanan, F. Zhang и др.

Для успешного решения указанных проблем необходимо наличие эффективных регуляторов переменного напряжения. Известные тиристорные регуляторы с фазовым регулированием плохо подходят для этого из-за искаженных форм входных и выходных токов и задержки в регулировании, связанной со свойствами естественной коммутации. В середине 90-х годов прошлого века появились транзисторные регуляторы переменного напряжения с накопительными реакторами и конденсаторами, характеризующиеся практически синусоидальными формами входных и выходных токов и хорошей динамикой их регулирования при высоких частотах переключения транзисторов. Особо здесь надо отметить возможность безтрансформаторного повышения выходного напряжения по отношению к входному у некоторых типах регуляторов.

Таким образом, показано, что видна необходимость в разработке регуляторов с улучшенным КЭЭ. Поэтому, диссертационная работа посвящена созданию регуляторов переменного напряжения с улучшенной электромагнитной совместимостью для электротехнических систем с улучшенным качеством электрической энергии.

Целью диссертационной работы является разработка научно-технических решений для создания энергосберегающих регуляторов переменного напряжения с практически синусоидальными входными и выходными токами для устройств улучшения качества электроэнергии (УУКЭ), таких как компенсаторов реактивной мощности, активных фильтров, компенсаторов провалов напряжения, несимметрии, фликкера и устройств плавного пуска асинхронных двигателей.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **задачи**:

1. Разработка новых регуляторов переменного напряжения (РПН).
2. Распространение прямого метода расчета энергетических показателей конверторов на их модели с переменными параметрами.
3. Анализ энергетических характеристик и сравнение их с результатами моделирования.
4. Разработка и анализ РПН, как устройств плавного пуска и регуляторов качества электроэнергии путем компенсации реактивной мощности, фильтрации высших гармоник, компенсации провалов напряжения, несимметрии и фликкера.
5. Создание и исследование экспериментального макета разрабатываемого регулятора.

Методы исследования. При выполнении исследований в работе использовались прямые методы анализа энергетических показателей вентильных преобразователей, аппарат рядов Фурье, элементы линейной алгебры, пакеты программ Mathcad и PSIM.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации, в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы», по государственному контракту № 2.1.2/3041 (2009-2010гг), 2.1.2/10941 (2011г.) и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному контракту 14.В37.21.0333 от 26 июля 2012г.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На уровне изобретений, предложены новые схемы энергосберегающих регуляторов переменного напряжения с практически синусоидальным входными и выходными токами для устройств улучшения качества электроэнергии.

2. Разработано расширение прямого метода расчета энергетических показателей на модели преобразователей с переменными параметрами.

3. Получены энергетические характеристики для зон повышения и понижения напряжения и оценки качества тока и напряжения новых регуляторов.

Практическая ценность работы. Представленный в работе анализ новых безтрансформаторных РПН показывает возможность использования преобразователей в качестве УУКЭ: компенсаторов реактивной мощности, активных фильтров, компенсаторов провалов напряжения, несимметрии, фликкера и устройств плавного пуска. Кроме того представленные регуляторы могут быть использованы в водном и железнодорожном транспорте, где требуется наличие преобразователей АС-АС напряжения и устройств пуска электроприводов. КПД исследуемых регуляторов в рабочей зоне достигает 97-99%, коэффициент гармоник входного тока, при этом остается равным до 5%, входной коэффициент мощности 0,85-0,92.

Помимо этого даны рекомендации по созданию системы управления в составе устройства плавного пуска на основе двузонного тиристорного РПН с улучшенной формой тока на входе регулятора и асинхронного двигателя. В сравнении с классическим однозонным РПН имеется заметное улучшение качества выходного тока (до двух и более раз) и входного тока (до двух раз), что соответственно уменьшит потери от тока в питающей сети.

На защиту выносятся:

1. Новые схемы регуляторов переменного напряжения с улучшенным качеством электрической энергии.

2. Расширение прямого метода расчета энергетических показателей на модели конверторов с переменными параметрами.

3. Результаты анализа энергетических характеристик и показателей качества электрической энергии новых схем регуляторов.

Достоверность полученных результатов обоснована теоретическими выкладками, подтверждается математическим и физическим моделированием, которые дали адекватные результаты.

Личный вклад автора состоит в анализе новых многозонных тиристорного и транзисторного РПН, повышающих безтрансформаторных РПН и повышающе-понижающих РПН с общим коммутатором; в выполнении расчетов и построении энергетических характеристик регуляторов; в проведении экспериментальных исследований созданного макета двузонного тиристорного трехфазного РПН.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы были внедрены в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ), переданы в ОАО “Авиационное оборудование”, г. Москва и ЗАО “ЭРАСИБ”, г. Новосибирск.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на 12 мероприятиях, основные из которых представлены ниже.

1. 4-й Международный форум по стратегическим технологиям. IFOST-2009, октябрь 21-23.

2. 12th International Conference and Seminar EDM'2011, June 30 – July 4.

3. Электроприводы переменного тока – ЭППТ-2012, Март 12-16.

4. Проблемы современной электротехники – ПСЭ-2012, 4-8 июня 2012.

5. 18-я международная научно-техническая конференция. Силовая электроника и эффективность – СЭЭ-2012, 17-21 сентября 2012.

6. 14th International Conference and Seminar EDM'2013, July 1-5.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликована 21 печатная работа, в том числе 3 работы в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, а также получен патент РФ на изобретение.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 167 страницах основного текста, состоит из введения, шести глав, заключения и 3 приложений, содержит 136 рисунков, 7 таблиц. Список литературы содержит 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы исследования диссертационной работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, описаны методы исследований и практическая ценность, дается краткое содержание глав работы.

В первой главе произведен аналитический обзор по теме диссертационного исследования, включающий анализ существующих устройств улучшения качества электроэнергии (УУКЭ), таких как компенсаторов реактивной мощности, активных фильтров, компенсаторов провалов напряжения, несимметрии, фликкера и устройств плавного пуска. Показано, что распространенные устройства плавного пуска на основе РПН портят форму пускового тока, создавая при этом дополнительную реактивную составляющую тока. Кроме того конверторы, используемые для стабилизации, регулирования,

улучшения качества электрической энергии требуют применения громоздких, дорогих реактивных элементов.

Как известно, в настоящее время актуальны несколько типов регуляторов переменного напряжения (далее РПН). К самым востребованным можно отнести тиристорные регуляторы с фазовым управлением, регуляторы с введением дополнительного напряжения (регуляторы с вольтодобавкой), регуляторы на вентилях с полным управлением с широтно-импульсным регулированием и управляемым обменом энергии накопительных элементов (повышающие регуляторы). Регуляторы переменного напряжения позволяют плавно, бесконтактно, быстро изменять переменное напряжение на нагрузке в отличие от громоздких, инерционных традиционных устройств на основе трансформаторов с переключением отводов, автотрансформаторов, управляемых реактивных балластных сопротивлений.

Известные типовые устройства плавного пуска асинхронных двигателей, содержащие встречно-параллельные тиристоры в каждой фазе, характеризуются пониженными энергетическими показателями во время пуска и ограниченным сверху единицей коэффициентом преобразования по напряжению.

Конверторы, используемые для целей стабилизации, регулирования, улучшения качества переменного напряжения, требуют применения громоздких, дорогих реактивных элементов в виде электролитических конденсаторов или реакторов соответственно.

Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости создания научно-технических решений для создания энергосберегающих регуляторов переменного напряжения с практически синусоидальными входными и выходными токами.

В конце главы приведены примеры промышленных разработок устройств плавного пуска, стабилизаторов напряжения, регуляторов переменного напряжения

Во второй главе представлено исследование предлагаемых в работе новых многозонных регуляторов, позволяющих компенсировать реактивную мощность, несимметрию, и получить регулируемый по времени плавный пуск с заданным качеством тока асинхронных и синхронных двигателей. Предложена методика анализа энергетических показателей конверторов, и получены внешние и регулировочные характеристики регуляторов.

Рассматриваются два подхода к построению устройств УУКЭ и плавного пуска асинхронных двигателей, позволяющих улучшить качество пускового тока двигателя и уменьшить дополнительное потребление реактивной мощности сети. Оба подхода используют симбиоз концепций дискретного амплитудного и фазового или широтно-импульсного регулирования. В первом подходе к построению устройств плавного пуска рассматривается применение входного конденсаторного делителя напряжения, позволяющего применить еще и зонное амплитудное регулирование выходного напряжения устройства плавного пуска. Последнее обстоятельство улучшает уже форму тока асинхронного двигателя, уменьшая его нагрев высшими гармониками.

Во втором подходе к построению устройств плавного пуска асинхронных двигателей применяется зонное амплитудное регулирование выходного напряжения и полностью устраняется входная реактивная мощность сдвига, обусловленная регулированием величины выходного напряжения устройства плавного пуска. Это достигается применением способа широтно-импульсного регулирования выходного напряжения с сохранением синфазности с напряжением питающей сети. Здесь требуется уже использование транзисторов вместо тиристоров.

Предлагаемая схема двухзонного тиристорного регулятора, рис. 1, имеет конденсаторный делитель, обеспечивающий получение половинного напряжения сети без использования трансформатора, что дает два уровня входного напряжения регулятора, а значит и две зоны регулирования выходного напряжения регулятора.

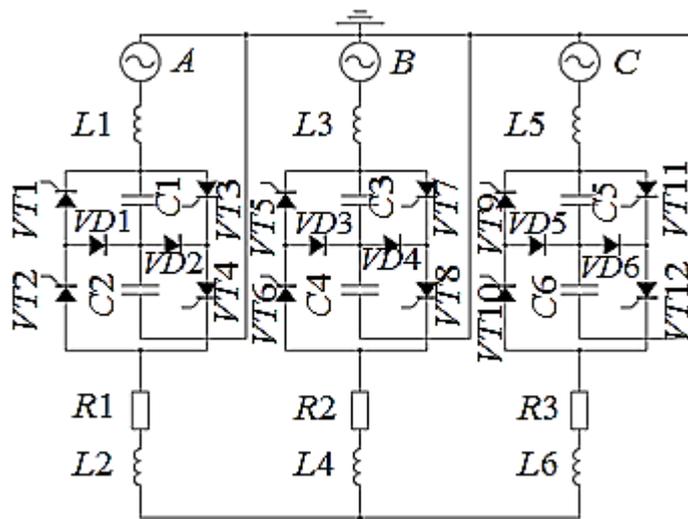


Рис. 1. Предлагаемая схема двухзонного трёхфазного тиристорного регулятора.

Тиристоры с дополнительными фиксирующими диодами включены, в отличие от классической схемы тиристорного регулятора, не встречно-параллельными группами, а последовательными цепочками, включенными встречно-параллельно. Это позволяет получить здесь на всех полупроводниковых приборах половинную величину напряжения сети, что обуславливает снижение стоимости тиристоров по сравнению с классической схемой регулятора.

Получена математическая модель регулятора в форме системы дифференциальных уравнений первого порядка с переменными (разрывными) коэффициентами.

Для того чтобы после процедуры преобразования дифференциальных уравнений в алгебраические уравнения для действующих значений первых гармоник переменных не вошли их фазы, «расщепим» первые гармоники переменных на их активные и реактивные составляющие, ортогональные друг другу.

В процессе алгебраизации умножим уравнения последовательно на $\cos(\omega t)$ и $\sin(\omega t)$ и усредним за период первой гармоники, в итоге получим систему из 8 уравнений.

Итоговая система уравнений в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \omega & 0 & 0 & 0 & -a_{11} & 2a_{12} \cdot d_1 & a_{12} & 0 \\ 0 & \omega & 0 & 0 & -2a_{21} \cdot d_1 & 0 & 0 & a_{21} \\ 0 & 0 & \omega & 0 & -a_{21} & 0 & 0 & a_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ a_{11} & -2a_{12} \cdot d_2 & -a_{12} & 0 & \omega & 0 & 0 & 0 \\ 2a_{21} \cdot d_2 & 0 & 0 & -a_{21} & 0 & \omega & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & -a_{21} & 0 & 0 & \omega & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{1(1)a} \\ X_{2(1)a} \\ X_{3(1)a} \\ X_{4(1)a} \\ X_{1(1)p} \\ X_{2(1)p} \\ X_{3(1)p} \\ X_{4(1)p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -U_{1(1)p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{1(1)a} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где: $i_H = x_1$, $u_{C1} = x_2$, $u_{C2} = x_3$, $i_1 = x_4$, $e = u_1$, $a_{11} = R_H/L_2$, $a_{12} = 1/L_2$, $a_{21} = 1/C$, $d_1 = [1/4 - 1/\pi^2 \cos(\phi)]$, $d_2 = [1/4 - 3/\pi^2 \cos(\phi)]$.

Воспользуемся формулой Крамера и найдем определитель системы:

$$\Delta = 4S_1 + S_2 + 4S_4 + 24S_2\psi(\psi - 1)^2 - 4S_3(2\psi - 1)^2 \quad (2)$$

где: $S_1 = a_{11}^2 a_{21}^2 \omega^2$, $S_2 = a_{12}^2 a_{21}^4$, $S_3 = a_{12} a_{21}^3 \omega^2$, $S_4 = a_{21}^2 \omega^4$.

Для нахождения токов и напряжений системы соответственно найдены $\Delta_1 - \Delta_j$, которые получаются из Δ заменой его j -го столбца столбцом свободных членов, откуда $X_{1(1)a} = \Delta_1/\Delta$, $X_{2(1)a} = \Delta_2/\Delta$, $X_{3(1)a} = \Delta_3/\Delta$, $X_{4(1)a} = \Delta_4/\Delta$ и т.д.

По результатам расчетов построены регулировочная характеристика и семейство внешних характеристик, рис. 2, двузонного тиристорного регулятора переменного напряжения, приведенные совместно с соответствующими характеристиками, полученными в модели программы PSIM.

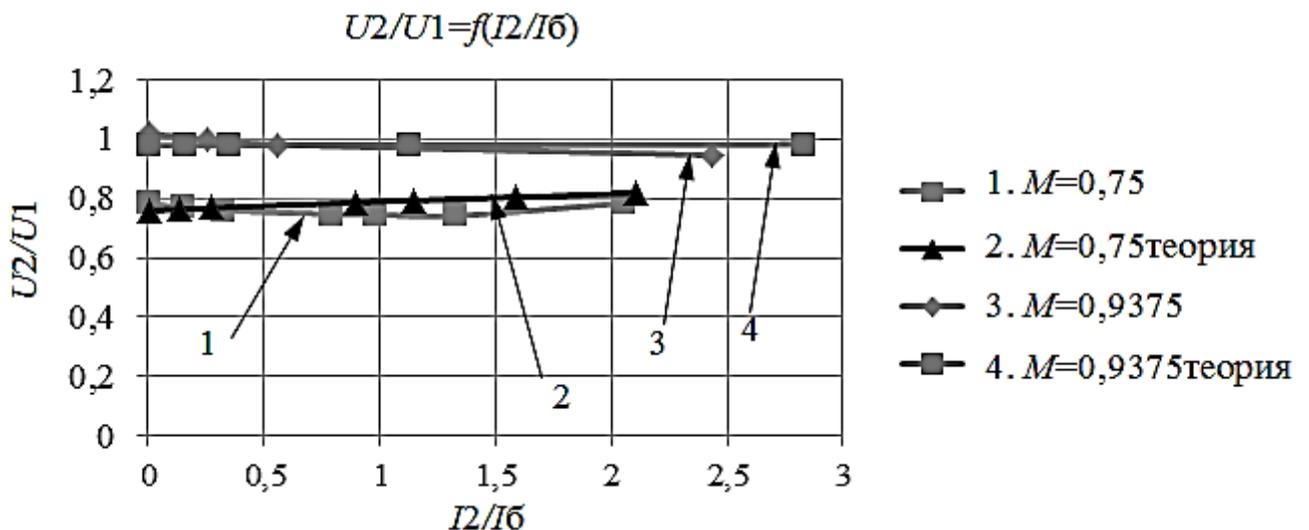


Рис. 2. Сравнение внешних характеристик, построенных в PSIM и теоретически (где I_b – ток конденсатора).

Также был произведен расчет токов и напряжений двузонного транзисторного РПН, определитель математической модели которого, имеет следующий вид:

$$\Delta = 4S_1 + 4S_4 + S_2[\psi(\psi - 2) + 1]^2 - 4S_3[\psi - 1]^2 \quad (3)$$

Остальные определители были получены аналогично (1).

В третьей главе рассматриваются новые безтрансформаторные транзисторные регуляторы переменного напряжения, свободные от ограничений типовых устройств плавного пуска, содержащих встречно-параллельные тиристоры:

- пониженных энергетических показателей во время пуска, что связано с несинусоидальностью форм выходных напряжений и выходных и входных токов, а также с наличием сдвига фазы тока относительно напряжения, увеличивающегося по мере регулирования вниз выходного напряжения;
- ограниченным сверху единицей коэффициентом преобразования по напряжению, не позволяя сохранять номинальное напряжение на выходе регулятора при снижении входного напряжения.

Новые безтрансформаторные транзисторные регуляторы переменного напряжения характеризуются синусоидальными входными и выходными токами и возможностью повышения напряжения, которые могут быть использованы как активные фильтры, компенсаторы фликкера и более качественные устройства плавного пуска асинхронных двигателей.

На рис. 3 представлена схема предлагаемого базового трехфазного транзисторного регулятора переменного напряжения. На рис. 4 показана векторная диаграмма, поясняющая принцип работы регулятора.

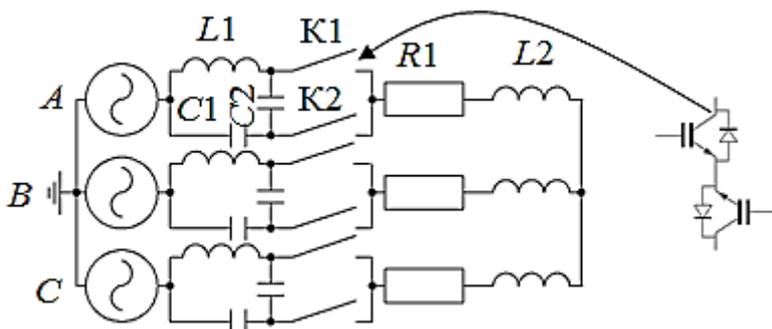


Рис. 3. Базовый трехфазный транзисторный РПН.

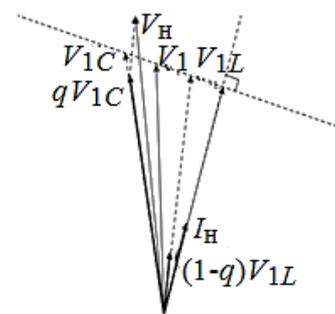


Рис. 4. Векторная диаграмма.

Регулятор работает следующим образом. Высокочастотные импульсы, подаваемые на ключи K_1 и K_2 , поочередно включают их, тем самым замыкая и разрывая цепи, содержащие или реактор L_1 , или конденсатор C_1 . Переключаясь между векторами первых гармоник напряжений V_{1C} и V_{1L} , которые характеризуют напряжение на нагрузке при включенной ветви с конденсатором C_1 или реактором L_1 , можно получить необходимое напряжение на нагрузке V_H , поскольку результирующий вектор выходного напряжения будет определяться геометрической суммой векторов qV_{1C} и $(1-q)V_{1L}$, и зависеть от

относительного времени q их включения. Конденсатор C_2 необходим, чтобы во время выключения ветви с реактором, накопленная энергия перенаправилась в конденсаторную ветвь.

Рассматриваются упрощенные транзисторные безтрансформаторные регуляторы переменного напряжения, рис. 5, способные поддерживать стабильным выходное напряжение с возможностью его регулирования для целей компенсации реактивной мощности сети или целей управляемого асинхронного электропривода. Ключи переменного тока в таком регуляторе расположены в ветвях с балластным реактором L_1 или конденсатором C_1 .

Дальнейшего уменьшения числа ключей в регуляторе можно получить, если обладать возможностью к доступу к обоим выводам фаз источника питания или нагрузки. Схема простого регулятора для такого случая показана на рис. 6.

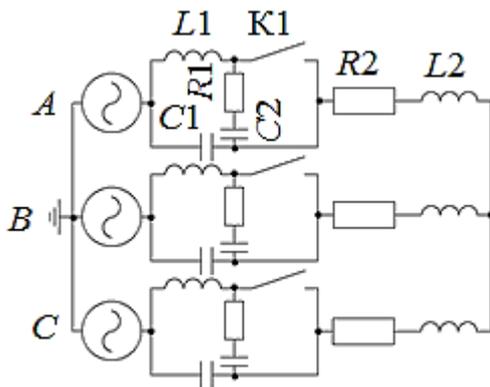


Рис. 5. Упрощенный трехфазный транзисторный РПН с коммутируемым реактором.

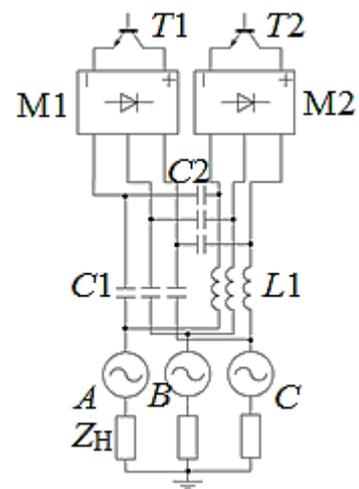


Рис. 6. Простой трехфазный транзисторный РПН с разделенными фазами источника.

В четвёртой главе предлагается и исследуется новое семейство повышающе-понижающих (ПП) АС-АС регуляторов, основанных на коммутации квази-импеданса источника питания с высокой частотой. На рис. 7 показана векторная диаграмма, поясняющая принцип работы регулятора. Внешний емкостной (конденсаторный) импеданс добавляется к собственному индуктивному импедансу собственно источника питания. Известно, что фаза напряжения на емкости в последовательной цепи противоположна фазе напряжения на индуктивности, т.е. напряжение на конденсаторе добавляется к напряжению источника питания. Можно повышать, понижать и стабилизировать напряжение на нагрузке, если регулировать с высокой частотой относительные длительности подключения нагрузки к цепям с указанными различными импедансами.

Один из вариантов схем нового семейства АС-АС регуляторов приведен на рис. 8. В схеме можно условно выделить три части. Первая часть – это источник питания со своим индуктивным реактансом, вторая часть – это цепь нагрузки из последовательно соединенных реактора и активного сопротивления

и третья часть – все остальное из реакторов, конденсаторов и коммутаторов между первой и второй частями. Назначение схемотехники третьей части – обеспечить коммутацию индуктивно-емкостных параметров импеданса между первой и второй частью, являющейся как бы внешним квази-импедансом источника. При этом не допустить скачков токов в реакторах и напряжений на конденсаторах.

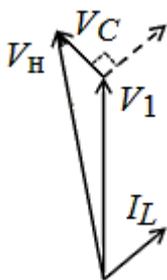


Рис. 7. Векторная диаграмма.

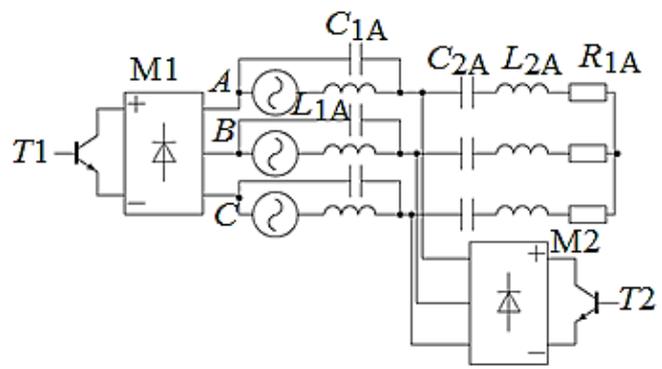


Рис. 8. Повышающе-понижающий РПН с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки до конденсаторов в нагрузке.

Регулятор (рис. 8) работает следующим образом: высокочастотные прямоугольные импульсы, подаваемые на ключ T_1 , включает его, тем самым коммутируя квази-импеданс источника питания с высокой частотой, внешний емкостной (конденсаторный) C_1 импеданс добавляется к индуктивному L_1 импедансу источника питания, функцию этого импеданса может выполнить или собственный индуктивный импеданс источника питания или дополнительно последовательно включенный импеданс реактора. Известно, что фаза напряжения на емкости V_C (рис. 7) в последовательной цепи противоположна фазе напряжения на индуктивности V_L , т.е. напряжение на конденсаторе V_C добавляется к напряжению источника питания V_1 . В зависимости от длительности включения ключа T_1 , возможно осуществить регулирование, в результате которого изменяется напряжение на нагрузке V_H . Можно повышать, понижать и стабилизировать напряжение на нагрузке, если регулировать с высокой частотой относительные длительности подключения нагрузки к цепям с указанными различными импедансами. Для получения эффекта управляемого нулевого вентиля добавлен трехфазный диодный мост M_2 с ключом T_2 , на который подаются в противофазе импульсы управления относительно тех, которыми управляется ключ T_1 .

Для построения математической модели регулятора по гладкой составляющей (первой гармонике) был использован прямой метод расчета АДУ2.

Результирующая матричная форма системы уравнений математической модели ПП АС–АС регулятора с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки без конденсаторов, получена аналогично (1).

Определитель данной системы имеет следующий вид:

$$\Delta = a_{44}^2 \left[a_{11}^2 (2a_{66}^2 - 1) - a_{66}a_{55} - b_{11}^2 - 2a_{11}b_{11} - b_{22} (b_{11} + a_{11}(\psi^2 + 2)) - b_{22}^2 \right] \quad (4)$$

где: $a_{11} = XC_1XL_1$, $a_{22} = XC_1XL_2$, $a_{33} = XL_1XL_2$, $a_{44} = \frac{1}{XC_1}$, $a_{55} = XC_1^2 + XL_1^2$,

$a_{66} = R_1$, $b_{11} = a_{11}\psi(\psi - 2)$, $b_{22} = a_{22} - a_{33}$.

Было построено семейство регулировочных характеристик, рис. 9, семейство внешних характеристик, и зависимость его входного коэффициента мощности от глубины модуляции.

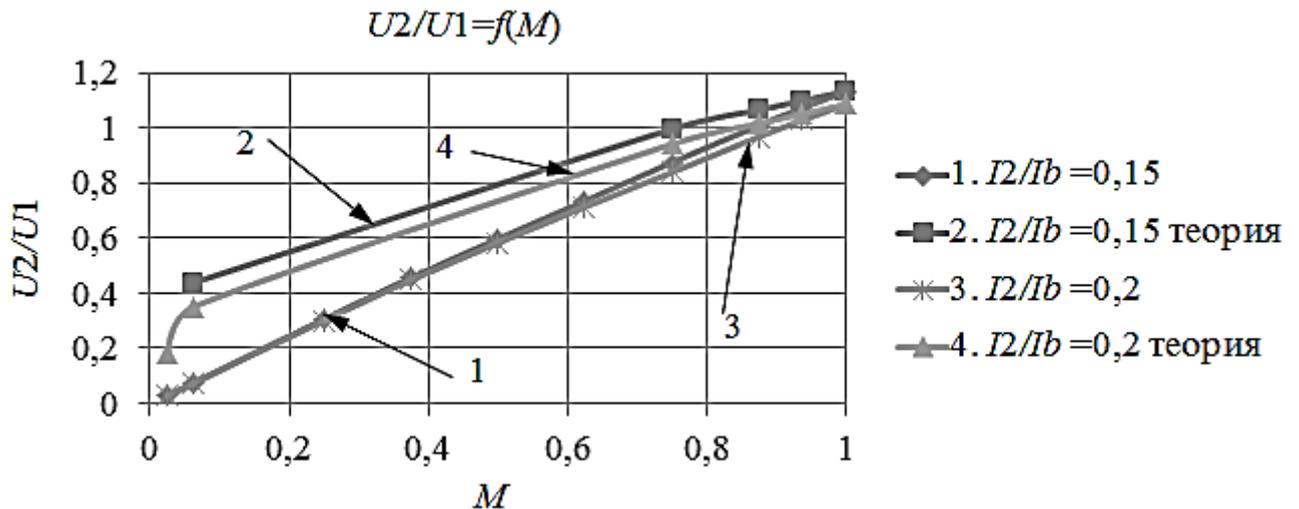


Рис. 9. Семейство регулировочных характеристик ПП АС–АС регулятора с коммутатором в нуле источника и цепи нагрузки без конденсаторов.

По результатам показано, что КПД данных регуляторов равен 96-98%, при этом коммутационные потери и проводимости составили 60 Вт и 100 Вт соответственно при частоте коммутации ключей 12 кГц, а реактивная мощность конденсаторов составила 4 кВАр при 40 кВт нагрузки.

В пятой главе были рассмотрены несколько нестандартных подходов к построению УУКЭ, а также устройств плавного пуска асинхронных двигателей, позволяющих улучшить качество пускового тока двигателя и уменьшить или даже свести к нулю дополнительное потребление реактивной мощности сети.

Качество выходного тока трехфазного двузонного тиристорного регулятора оценено коэффициентом гармоник тока, рис. 10. По сравнению с однозонным регулированием имеется заметное улучшение качества (до двух и более раз). Это позволит обеспечить плавный безопасный по перегреву пуск двигателя.

Качество входного тока двузонного регулятора оценено коэффициентом гармоник тока, показанным на рис. 10. Здесь наблюдается уменьшение до двух раз доли высших гармоник во входном токе, что соответственно уменьшит потери от тока в питающей сети.

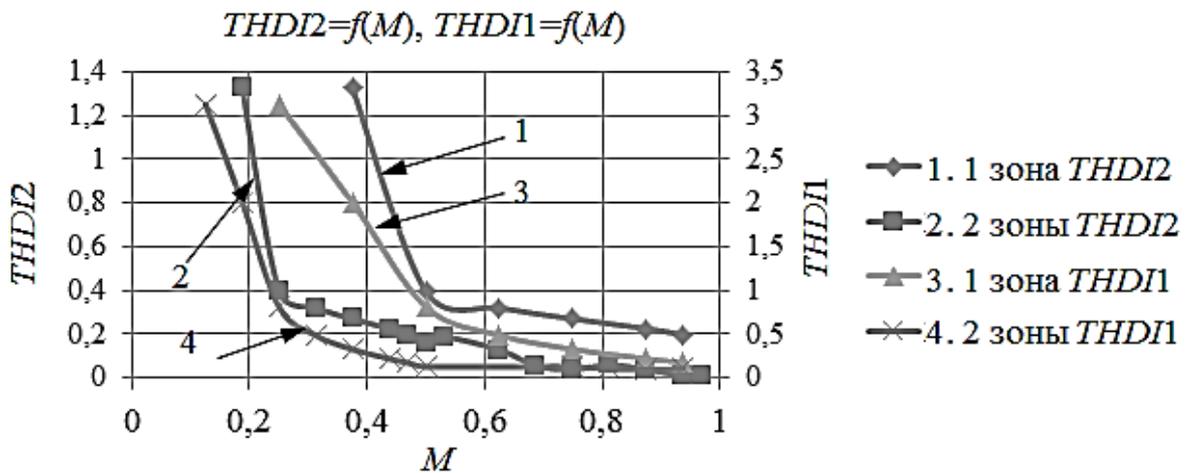


Рис. 10. Коэффициент гармоник выходного тока и входного тока двузонного РПН

По полученным данным в процессе моделирования в PSIM были сняты, внешняя характеристика и зависимость КПД от глубины модуляции рис. 11 ПБ РПН с пофазными коммутаторами.

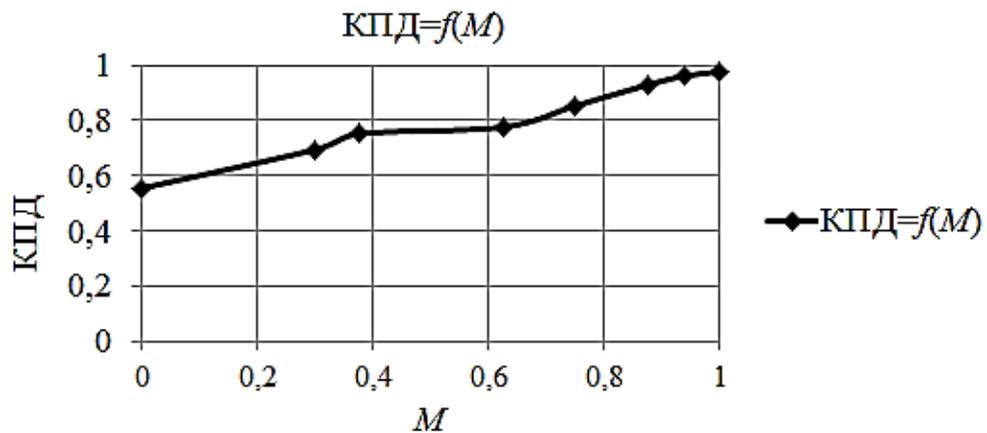


Рис. 11. КПД ПБ РПН с пофазными коммутаторами.

Приведены варианты применения, представленных в диссертации регуляторов, в качестве УУКЭ: компенсатор реактивной мощности (рис. 12, рис. 13), активный фильтр (рис. 14), компенсатор провалов напряжения, компенсатор несимметрии, компенсатор фликкера и как элемент “умной” сети.

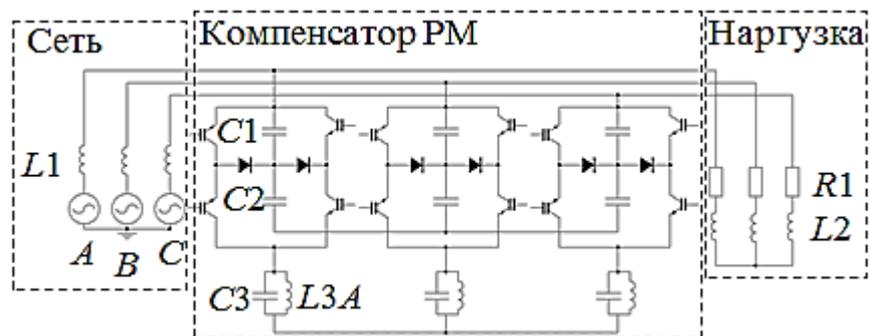


Рис. 12. Двузонный транзисторный РПН, как компенсатор реактивной мощности.

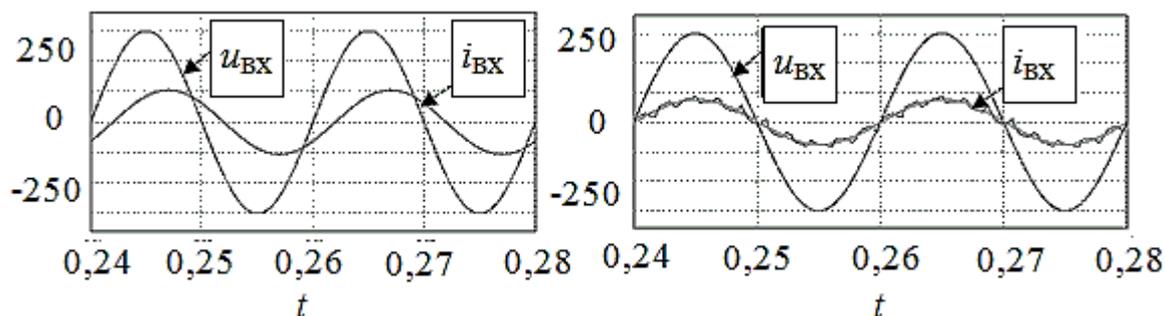


Рис. 13. Входной и выходной ток и напряжение до и после компенсации.

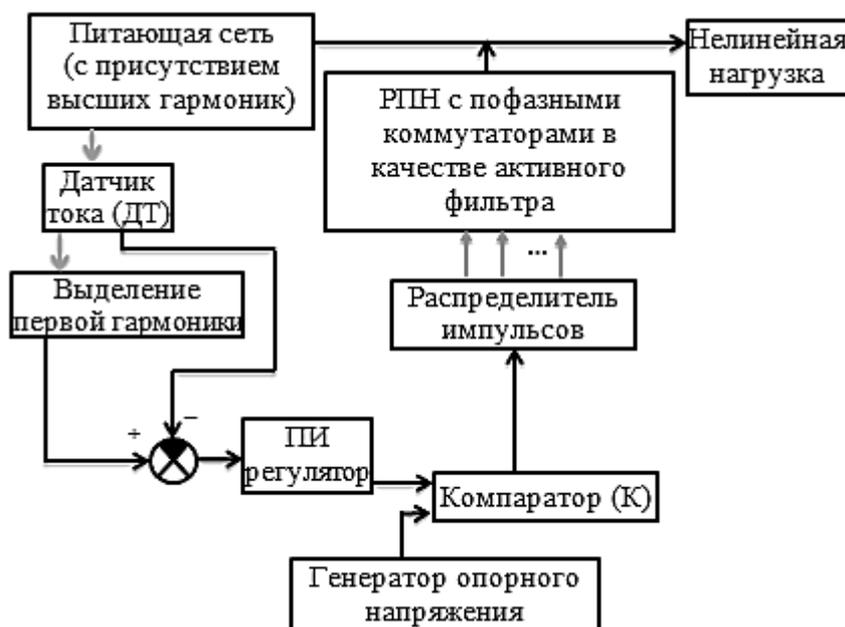


Рис. 14. Система управления активного фильтра.

В шестой главе приведены результаты моделирования регуляторов и поставленного эксперимента.

При разработке макета трехфазного двузонного тиристорного регулятора переменного напряжения большое внимание было уделено системе управления, которая изначально была смоделирована в программе PSIM и реализована на аналоговых элементах.

В первую очередь отказ от этой системы управления был связан со сложностью настройки, поскольку небольшие правки в формировании импульсов управления приводили к конструктивным изменениям. Во-вторых, при выполнении систем защиты возникли похожие трудности, которых можно было бы избежать в системе управления на микроконтроллере.

Программирование выполнялось на языке СИ в программе редакторе и компиляторе WINAVR с использованием программатора AVR910. В качестве микроконтроллера был выбран Atmel AVR Atmega 128A.

Экспериментальный макет софт-стартера работает на входном напряжении равном $U_{inA} = 170V$. Напряжение и ток нагрузки регулятора, управляемого данной системой управления показан на рис. 15.

По данным эксперимента были сняты регулировочная (рис. 16), внешняя характеристика и зависимость входного коэффициента мощности от глубины модуляции, в сравнении с данными полученным в PSIM.

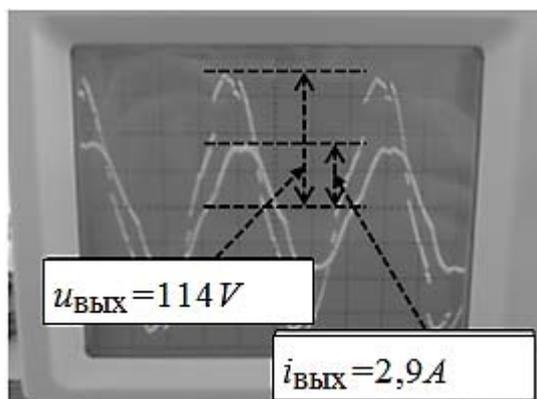


Рис. 15. Напряжение и ток нагрузки в верхней зоне регулирования

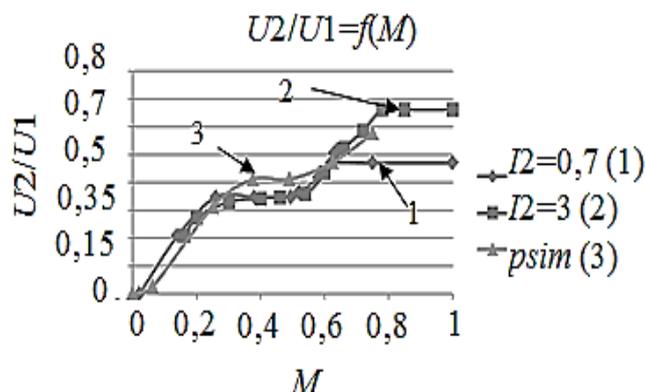


Рис. 16. Регулировочная характеристика.

В **заклучении** сформулированы основные результаты работы:

1. Рассмотренные и исследованные многозонные регуляторы переменного напряжения позволяют улучшить качество пускового тока двигателя, компенсировать реактивную мощность и несимметрию. Кроме того, радикально улучшается использование вентилей по напряжению, позволяя строить высоковольтные регуляторы без использования высоковольтных тиристоров.

2. Предложенные безтрансформаторные регуляторы переменного напряжения, имеют ряд отличительных особенностей, а именно: практически синусоидальные входные и выходные токи, возможность увеличивать за единицу коэффициент преобразования по напряжению. В случае выполнения нагрузки или автономного трехфазного источника с отдельными фазами регулятор содержит всего два управляемых ключа и два диодных моста.

3. Представленный новый тип повышающе-понижающих регуляторов переменного напряжения имеет практически синусоидальные входные и выходные токи, он основан на коммутации квази-импеданса источника питания с высокой частотой.

4. Построено расширение прямого метода расчета энергетических показателей конверторов на их модели с переменными параметрами, приводящим к дифференциальным уравнениям с периодическими разрывными коэффициентами. По результатам этого метода расчета переменных состояний были построены энергетические характеристики и оценено качество тока и напряжения.

5. Предложенные в диссертационной работе регуляторы (многозонные РПН, ПБ РПН с пофазными коммутаторами, ПП РПН с общим коммутатором) могут быть использованы в качестве стабилизаторов и УУКЭ, позволяющие повышать, понижать и стабилизировать напряжение на нагрузке, при этом входной и выходной токи остаются практически синусоидальными.

6. Создан экспериментальный макет двузонного трехфазного тиристорного регулятора переменного напряжения и произведено сравнение экспериментально-полученных данных с полученными при помощи моделирования в программе PSIM.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Зиновьев, Г.С. Энергосберегающие устройства плавного пуска высоковольтных двигателей переменного напряжения / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко, А.П. Усачёв // Технічна Електродинаміка. – 2009. – Ч. 4. – С. 45-49.

2. Zinoviev, G.S. Energy saving in induction machines two-zone transformless soft-starter / G.S. Zinoviev, A.V. Udovichenko // Power System Design Europe. – 2009. – P. 42-43.

3. Зиновьев, Г.С. Энергосберегающие устройства плавного пуска высоковольтных двигателей переменного напряжения / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко, В.Н. Максименко // 4-й Международный форум по стратегическим технологиям: IFOST. – 2009. – 4D. – С. 262-266.

4. Зиновьев, Г.С. Энергосберегающие устройства плавного пуска двигателей переменного напряжения / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 52-55.

5. Zinoviev, G.S. New multizone soft starters of alternating-voltage machines / G.S. Zinoviev, A.V. Udovichenko // Power Electronics Intelligent Motion Power Quality: PCIM. – 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

6. Удовиченко, А.В. Исследование многозонного регулятора переменного напряжения / А.В. Удовиченко // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – № 2. – С. 129-138.

7. Удовиченко, А.В. Разработка и исследование многозонного трехфазного тиристорного регулятора напряжения / А.В. Удовиченко // Всероссийская научная конференция. Наука. Технологии. Инновации. – 2010. – Ч. 1. – С. 326-327.

8. Udovichenko, A.V. Development and research of three-phase multizone thyristor voltage regulator / A.V. Udovichenko // Siberian Innovative Technologies. – 2011. – P. 23-24.

9. Udovichenko, A.V. New Energy Saving Multizone Alternating-Voltage Soft Starters of Industrial Machines / A.V. Udovichenko // 12th International Conference and Seminar EDM. – 2011. – P. 415-419.

10. Пат. 2479102 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/22. Регулятор переменного напряжения / Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В. ; заявитель и патентообладатель Новосиб. гос. техн. ун-т. – № 2011146812/07 ; заявл. 17.11.11 ; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10. – 7 с. : ил.

11. Удовиченко, А.В. Энергосберегающие устройства плавного пуска высоковольтных двигателей переменного напряжения / А.В. Удовиченко // Всероссийская научная конференция. Наука. Технологии. Инновации. – 2011. – С. 270-272.

12. Удовиченко, А.В. Цифровая система управления для трехфазного двузонного тиристорного регулятора переменного напряжения / А.В. Удовиченко, Д.А. Рожденко // Радиопромышленность. – 2012. – №1. – С. 133-140.
13. Зиновьев, Г.С. Бестрансформаторный повышающее-понижающий регулятор переменного напряжения / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко // Радиопромышленность. – 2012. – №1. – С. 149-157.
14. Зиновьев, Г.С. Бестрансформаторные повышающие регуляторы переменного напряжения с синусоидальными токами для устройств плавного пуска асинхронных двигателей / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко // Электроприводы переменного тока: ЭПТТ. – 2012. – С. 55-58.
15. Заявка 2012111039 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/00. Регулятор переменного напряжения / Зиновьев Г.С., Удовиченко А.В. ; заявитель Новосиб. гос. техн. ун-т. ; № 2012111039/07 ; заявл. 22.03.12 ; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. – 7 с. : ил.
16. Зиновьев, Г.С. Бестрансформаторные повышающие регуляторы переменного напряжения с синусоидальными входным и выходным токами / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко // Проблемы современной электротехники: ПСЭ. Технічна Електродинаміка. – 2012. – Ч. 3. – С. 69-70.
17. Udovichenko, A.V. Transformerless Step Up Alternating Voltage Regulators With Sinusoidal Currents / A.V. Udovichenko, G.S. Zinoviev // 13th International Conference and Seminar EDM. – 2012. – P. 338-341.
18. Зиновьев, Г.С. Повышающие бестрансформаторные регуляторы переменного напряжения с синусоидальными токами / Г.С. Зиновьев, А.В. Удовиченко // 18-я международная научно-техническая конференция. Силовая электроника и эффективность: СЭЭ. Технічна Електродинаміка. – 2012. – Ч. 4. – С. 87-91.
19. Удовиченко, А.В. Цифровая система управления для двузонного тиристорного регулятора переменного напряжения / А.В. Удовиченко, Д.А. Рожденко // Всероссийская научная конференция. Наука. Технологии. Инновации. – 2012. – Ч. 2. – С. 213-215.
20. Udovichenko, A.V. New Family of AC regulators with the Switched Quasi-Impedance of Power Supply or Load / A.V. Udovichenko, G.S. Zinoviev // 14th International Conference and Seminar EDM. – 2013. – P. 377-381.
21. Udovichenko A.V. Digital Control System With System of Automatic Control for Three-Phase Two-Zone Thyristor AC Voltage Regulator / D.A. Rozhdenko, A.V. Udovichenko // 14th International Conference and Seminar EDM. – 2013. – P. 374-376.