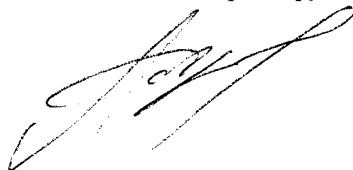


05.09.12  
П721

Контрольный  
экземпляр

На правах рукописи



Преображенский Кирилл Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск

2006

Работа выполнена на кафедре «Системы электроснабжения»  
Южно-Уральского государственного университета.

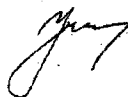
- Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Хохлов Ю.И.
- Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Цытович Л.И.;  
доктор технических наук,  
профессор Сарваров А.С.
- Ведущее предприятие – ОАО «НПО Электромашина»,  
г. Челябинск

Защита состоится 30 ноября 2006 г., в 10-00 часов, в ауд.1001 на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ. Факс: (351) 267-90-83. E-mail: preok@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одной из важнейших в политике энергосбережения является проблема снижения потерь и повышения качества электрической энергии в электрических сетях. Во многих технологических процессах используются нагрузки, включаемые через тиристорные ключи, например, печи сопротивления, асинхронные электродвигатели с плавным пуском. В результате применения этих устройств сеть загружается реактивными токами и высшими гармониками, существенно ухудшающими качество электрической энергии. В сетях до 1 кВ для повышения коэффициента мощности находят применение конденсаторные батареи. При применении нагрузок, включаемых через тиристорные ключи, совместно с компенсирующими конденсаторами возникают высокочастотные колебания, существенно ухудшающие синусоидальность напряжения сети.

Большой шаг, сделанный в последние годы в области создания новых классов полупроводниковых приборов, таких как IGBT тиристоры и IGBT транзисторы, позволяет в СЭС, содержащих обратимые преобразователи напряжения, решить задачи улучшения совместимости нагрузок с сетью, применив существующие силовые схемы и совершенствуя системы управления.

Актуальна задача создания устройств управляемой компенсации пассивной мощности (реактивной мощности и мощности искажений) на основе использования вентиляльных преобразователей, необходимых в технологических процессах, путем возложения на них дополнительных функций без серьезных дополнительных капитальных затрат.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является анализ способов компенсации пассивной мощности в сетях напряжением до 1000 В и обоснование целесообразности построения комбинированной системы электроснабжения постоянного и переменного напряжения на основе применения вентиляльных преобразователей-компенсаторов (ВПК), обеспечивающих питание нагрузок постоянным током и одновременно управляемую компенсацию пассивной мощности в сети переменного напряжения.

**Идея работы** заключается в использовании обратимых преобразователей напряжения для одновременного питания нагрузок постоянным током и управляемой компенсации пассивной мощности на стороне переменного напряжения.

**Методы исследования.** Для анализа электромагнитных процессов в системе «сеть – вентиляльные преобразователи – нагрузки» применялись: классический метод расчета переходных процессов, расчет с помощью пакетов прикладных программ Matcad и MatLab+Simulink. Численное решение системы уравнений на ЭВМ проводилось с помощью методов Рунге-Кутты. При оценке спектрального состава напряжений и токов использован метод гармонического анализа. Также были применены элементы дифференциального и интегрального исчисления. Для обобщения результатов, полученных численными методами, была использована теория планирования эксперимента.

### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

— применение комбинированных СЭС переменного и постоянного напряжения с управляемой компенсацией пассивной мощности целесообразно при наличии мощных нагрузок, потребляющих постоянный ток;

— способ управления вентильным преобразователем-компенсатором, обеспечивающий стабилизацию постоянного напряжения и управляемую компенсацию пассивной мощности;

— результаты анализа электромагнитных процессов в системах, содержащих сеть, вентильный преобразователь-компенсатор, нагрузки на стороне постоянного и переменного напряжения, в том числе включенные через тиристорные ключи;

— методика применения теории планирования эксперимента для анализа электромагнитных процессов в СЭС со сложными нагрузками.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается корректным использованием методов расчета переходных процессов при общепринятых допущениях в математических моделях, а также удовлетворительным совпадением результатов теоретических исследований с компьютерным моделированием в пакетах MatLab+Simulink и экспериментальными данными.

### **Научное значение работы:**

— впервые получены регрессионные уравнения связи основных параметров вентильного преобразователя-компенсатора и сетевого фильтра с коэффициентом искажения синусоидальности кривой питающего напряжения сети;

— впервые разработаны цифровые модели СЭС, питающей потребителей, включаемых через тиристорные ключи, и ВПК с управляемой компенсацией пассивной мощности, с учетом внутренних сопротивлений сети;

— результаты регрессионного анализа электромагнитных процессов в СЭС позволили сформулировать критерии выбора элементов силовой части вентильного преобразователя-компенсатора.

### **Практическое значение работы:**

— предложена энергоэффективная комбинированная СЭС постоянного и переменного напряжения с управляемой компенсацией пассивной мощности;

— разработана структура системы управления вентильным преобразователем-компенсатором, обеспечивающая высокий  $\cos \varphi$  и низкий коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети при нагрузках, потребляющих несинусоидальные токи;

— разработана методика применения теории планирования эксперимента для анализа процессов в сложных СЭС.

**Реализация результатов работы.** Рекомендации по применению компенсирующих устройств в сетях с тиристорными регуляторами переданы в ОАО «Южуралэлектромонтаж».

Оформленные в виде отдельных разделов и математических моделей результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ЮУрГУ в курсах «Основы энергосберегающей энергетической электроники». «Системы электроснабжения на основе устройств силовой преобразовательной техники».

**Апробация работы.** Основные теоретические положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях ЮУрГУ, международном VII Симпозиуме «Электротехника. 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии» (Москва, Ассоциация ТРАВЭК, 2003), на Всероссийской научно-практической конференции «Энерго-ресурсосбережение» (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2003), на второй Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Москва, ИПУ РАН, 2004), международном VIII Симпозиуме «Электротехника. 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии» (Москва, Ассоциация ТРАВЭК, 2005), на международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока ЭППГ - 05». (Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2005), на международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XII Бенардосовские чтения) (Иваново, ИГЭУ, 2005), на XXV Российской школе по проблемам науки и технологии, посвященной 60-летию Победы (Миасс, МСНТ, 2005).

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 9 печатных трудов.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 148 с. основного текста, 68 иллюстраций, 10 с. списка литературы из 98 наименований, 4 приложения. Общий объем работы составляет 199 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, дана аннотация полученных результатов и положений, выносимых на защиту.

**В первой главе** отмечено, что в настоящее время низковольтные электрические сети России насыщены устройствами преобразовательной техники, вызывающими существенные искажения кривых напряжения и тока, что существенно обострило проблему электроснабжения потребителей качественной электроэнергией. Рассмотрены показатели качества электрической энергии и энергетические показатели. Отмечено существенное влияние на эти показатели потребителей электрической энергии, питающихся от сети через тиристорные ключи.

Рассмотрены способы повышения коэффициента мощности и уменьшения искажения синусоидальности кривой напряжения сети. Наибольшее применение в сетях до 1 кВ имеют конденсаторы, обычно включаемые параллельно нагрузкам. При параллельной работе конденсаторов и тиристорных регуляторов существенно ухудшается качество напряжения. Тиристорные компенсаторы реактивной мощности косвенной компенсации дополнительно ухудшают синусоидальность напряжения сети. Компенсаторы с вентильным источником реактивной мощности на основе схем с одноступенчатой

искусственной коммутации не нашли применения в низковольтных сетях. Компенсаторы реактивной мощности, выполненные на запираемых тиристорах и IGBT транзисторах, изготавливаются рядом фирм только для высоких напряжениях и больших мощностей. Уменьшение искажения синусоидальности кривой напряжения обеспечивается применением пассивных фильтров, а также в последние годы активными фильтрами, выполненными на базе инверторов напряжения с ШИМ, работающими в обратном режиме.

Все вышеописанные способы требуют применения специализированных устройств и, соответственно, дополнительных затрат. Поэтому в сетях до 1 кВ из рассмотренных способов получили достаточное применение только конденсаторные батареи.

В настоящее время, все более широкое применение получают компенсированные выпрямители, выполненные на неуправляемых вентилях, активные выпрямители и корректоры коэффициента мощности, позволяющие выдать на выходе преобразованную электрическую энергию, требуемую технологическим процессом, и одновременно обеспечить потребление из сети минимальной реактивной мощности или даже выдачу ее в сеть. При этом, активные выпрямители и корректоры коэффициента мощности потребляют из сети ток, близкий к синусоидальному. Отмечается, что эти устройства компенсации выдают реактивную мощность независимо от ее дефицита в сети.

Представляются перспективными устройства, обеспечивающие электроснабжение каких-либо потребителей на постоянном токе и одновременно повышающие энергетические показатели всей СЭС и качество напряжения в ней. Назовем такие устройства вентильными преобразователями-компенсаторами (ВПК) пассивной мощности. Они управляются так, чтобы суммарный ток, потребляемый из сети, приближался к оптимальному, т.е. чтобы ток был синусоидальным и имел заданный угол сдвига  $\varphi$  относительно напряжения (например,  $\varphi=0$ ).

Приведена классификация устройств повышающих энергетические показатели низковольтных СЭС и качество электрической энергии.

В результате проведенного обзора литературы сформулированы следующие задачи исследований:

- 1) исследование электромагнитных процессов в СЭС, содержащих нагрузки, включаемые через вентильные ключи и устройства компенсации реактивной мощности и мощности искажений;

- 2) выбор перспективных средств повышения коэффициента мощности и качества электрической энергии в СЭС в зависимости от состава потребителей;

- 3) исследование электромагнитных процессов в ВПК пассивной мощности, разработка принципов построения их систем управления и обоснование целесообразности построения комбинированной системы электроснабжения постоянного и переменного напряжения на основе применения ВПК, обеспечивающих питание нагрузок постоянным током и одновременно управляемую компенсацию пассивной мощности в сети переменного тока.

**Вторая глава** посвящена исследованию способов повышения коэффициента мощности и качества электрической энергии в однофазных сетях на основе применения виртуального моделирования и планирования эксперимента.

В этой главе для простейших однофазных СЭС с нагрузками, включенными через тиристорные ключи, и устройствами компенсации (рис. 1) построены математические модели на основе классического метода расчета переходных процессов, а также с применением комплексов программ «Matcad» и «MatLab+Simulink».

Аналитический расчет даже простейших схем приводит к весьма сложным выражениям. Например, ток в  $n$ -ом интервале для схемы рис. 1, д выражается:

$$i_n = \frac{1}{x_c} \frac{du_{cn}}{d\vartheta} = \frac{U_m}{x_L \sqrt{(1-\nu^2)^2 + 4\delta^2}} \sin\left(\vartheta - \arctg \frac{1-\nu^2}{2\delta} - (n-1)\pi\right) + \frac{1}{\nu^2 x_L} k_1 A_{1n} e^{k_1[\vartheta - (n-1)\pi]} + \frac{1}{\nu^2 x_L} k_2 A_{2n} e^{k_2[\vartheta - (n-1)\pi]},$$

где  $\nu = \sqrt{\frac{x_c}{x_L}}$ ;  $\delta = \frac{R_n}{2x_L}$ ;  $x_L = \omega L_n + x_s$ ;  $x_c = \frac{1}{\omega C}$ .

Аналитические методы, в пределах принятых допущений, безусловно, являются более ценными. Однако, как видно из приведенной выше формулы, полученной аналитически, выражения даже при описании простейших СЭС плохо обозримы и позволяют оценить влияние отдельных факторов только при применении ЭВМ.

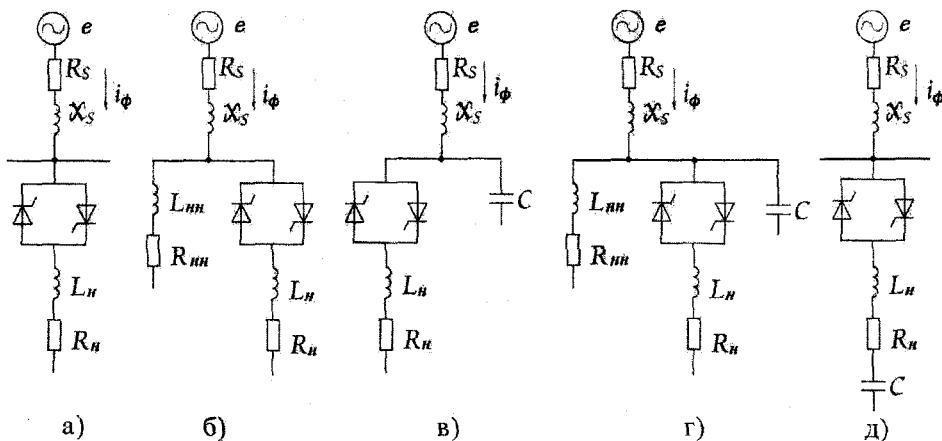


Рис. 1. Однофазные СЭС

Дальнейшие исследования выполнялись с помощью комплекса программ «MatLab+Simulink». Адекватность моделей, полученных аналитически, с помощью пакета программ «MatLab+Simulink» была проверена экспериментально на лабораторном стенде (рис. 2) для схемы рис. 1, д.

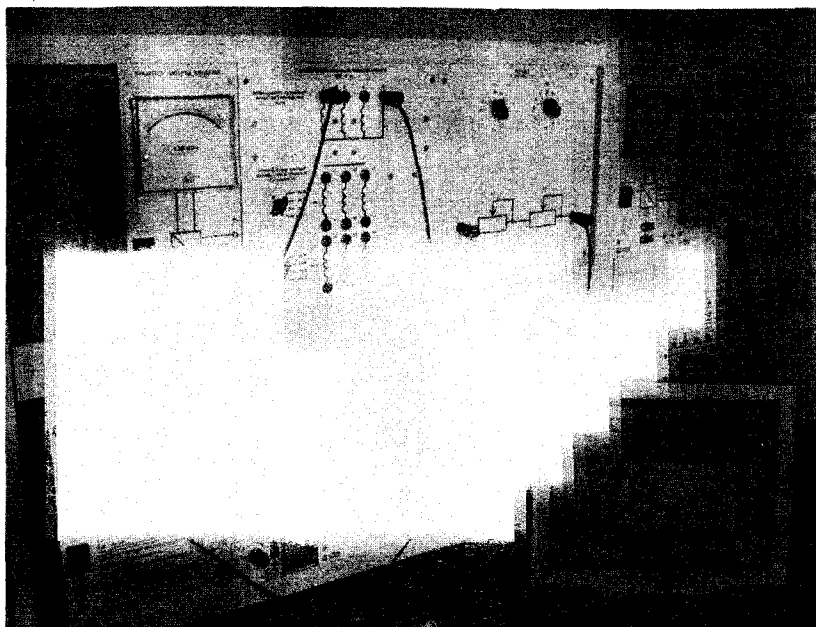


Рис. 2. Лабораторный стенд для исследования СЭС

При моделировании электромагнитных процессов в системах электроснабжения (СЭС) возникают трудности с обобщением решений, полученных численными методами. Применение теории планирования эксперимента (ТПЭ) позволяет в аналитическом виде представить результаты численных исследований и с достаточной точностью оценить влияние различных факторов. Методы теории планирования эксперимента позволяют преобразовать исходную систему дифференциальных уравнений в уравнения регрессии, аналитически связывающие выходные величины с интересующими параметрами. При этом уравнение связи между выходными параметрами  $Y$  и входными переменными  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  записываются в виде некоторого полинома – отрезка ряда Тейлора:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i \cdot x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j < e \leq k} b_{ije} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_e,$$

где  $k$  – число переменных;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, b_{ije}$  – коэффициенты уравнения регрессии.



В данной главе была отработана методика применения теории планирования эксперимента для СЭС, содержащей вентильный преобразователь (см. рис. 1, а). Обоснован выбор функций цели и варьируемых обобщенных параметров. В качестве зависимых переменных (функций цели) лучше выбрать основные показатели определяющие качество электроэнергии и эффективность ее потребления –  $\cos \varphi$  и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в точке присоединения к сети ( $K_U$ ).

В качестве независимых переменных в уравнениях регрессии достаточно просто выбрать физические параметры силовой цепи СЭС. Однако лучше для обобщения результатов по возможности переходить к относительным величинам. По методу Плакетта–Бермана был проведен отсев малозначимых факторов. Эксперимент был проведен по симметричному ротatableльному центральному композиционному униформ – плану второго порядка для  $k=3$  факторов со звездными точками. Рассчитанные по программе коэффициенты регрессии при кодированных переменных для выходных величин  $\cos \varphi$ ,  $K_U$ ,  $K_{U(3)}$  позволили получить уравнения регрессии. Например, уравнение регрессии в кодированных величинах для  $Y_1 = \cos \varphi$  выглядит следующим образом:

$$Y_1 = 0,66903 - 0,11572 \cdot x_1 + 0,00447 \cdot x_2 + 0,11 \cdot x_3 - \\ - 0,01715 \cdot (x_1^2 - 0,73) - 0,0051 \cdot (x_2^2 - 0,73) + \\ + 0,02411 \cdot (x_3^2 - 0,73) + 0,0028 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,00265 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ + 0,00213 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0014 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3,$$

где  $x_1$  – кодированное значение угла управления  $\alpha$ ,  $x_2$  – кодированное значение  $R_n / X_s$ ,  $x_3$  – кодированное значение косинуса угла сдвига нагрузки ( $\cos \varphi_n$ ).

Для перехода к реальным величинам необходимо воспользоваться формулами перехода.

Проверка адекватности моделей и значимости коэффициентов уравнения регрессии проводилась по критериям Фишера и Стьюдента. Проведенный анализ показал, что полученные уравнения регрессии могут обеспечить приемлемую точность расчетов основных электрических величин, характеризующих установившийся режим работы СЭС.

Для более наглядного анализа влияния факторов на значения выходных величин можно выполнить графические построения.

На рис. 3 приведено семейство поверхностей, построенных по уравнениям регрессии, для результирующего  $\cos \varphi$  при различных значениях  $\cos \varphi_n$ .

Таким образом, применение теории планирования эксперимента позволило в аналитическом виде представить результаты численных исследований и на основе построения пространственных изображений с достаточной точностью оценить влияние параметров нагрузки и угла управления.

В третьей главе исследуются способы повышения коэффициента мощности и качества электрической энергии в трехфазных сетях, при питании активно-индуктивных, статических и динамических нагрузок, включенных через тиристорные ключи, с применением устройств компенсации (рис. 4).

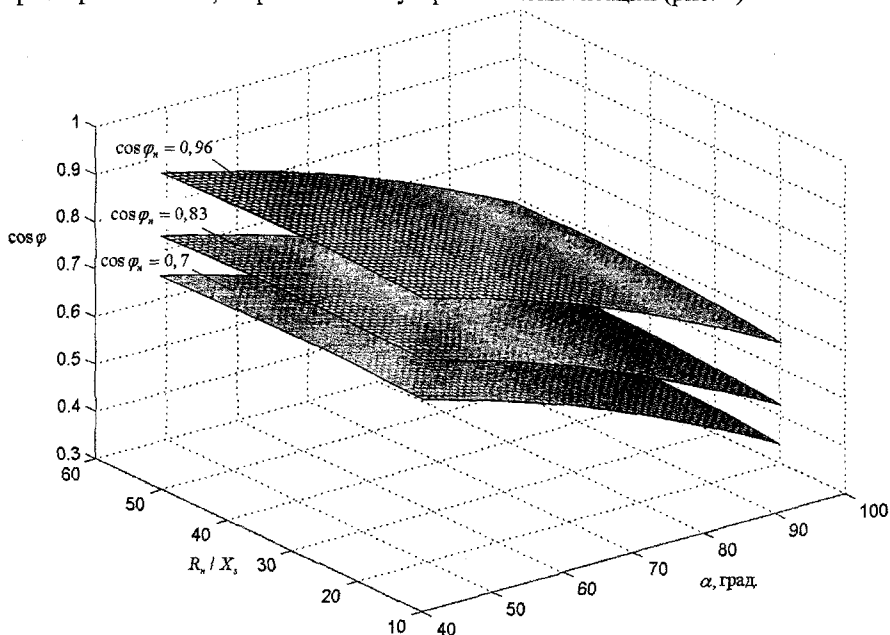


Рис. 3. Семейство поверхностей, отображающих зависимость результирующего  $\cos \varphi$  от параметров нагрузки и угла управления

При наличии компенсирующих емкостей на шинах сети и тиристорном пуске асинхронного двигателя (см. рис. 4, г) резко ухудшалась форма напряжения сети. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения во время пуска достигал 16%.

При применении конденсаторных батарей для параллельной компенсации в трехфазных СЭС, питающих нагрузки, включенные через тиристорные регуляторы, как и в однофазных системах, наблюдается резкое увеличение гармоник тока и ухудшение синусоидальности напряжения питающей сети из-за возникновения резонанса на высших гармониках.

В четвертой главе рассматривается применение комбинированных СЭС постоянного и переменного напряжения как способ повышения результирующего коэффициента мощности и качества электрической энергии

Исследованы вентильные компенсаторы пассивной мощности (ВК), выполненные на IGBT транзисторах при двух способах управления:

1) с измерением тока потребляемого из сети всеми потребителями и коррекцией его амплитуды за счет обратной связи по напряжению на

конденсаторе фильтра ВК и формированием синусоидального тока, находящегося в фазе с напряжением сети с помощью релейной системы;

2) с измерением суммарной активной мощности потребляемой всеми нагрузками, расчетом требуемой амплитуды тока, коррекцией его амплитуды за счет обратной связи по напряжению на конденсаторе фильтра ВК и формированием синусоидального тока, находящегося в фазе с напряжением сети с помощью релейной системы.

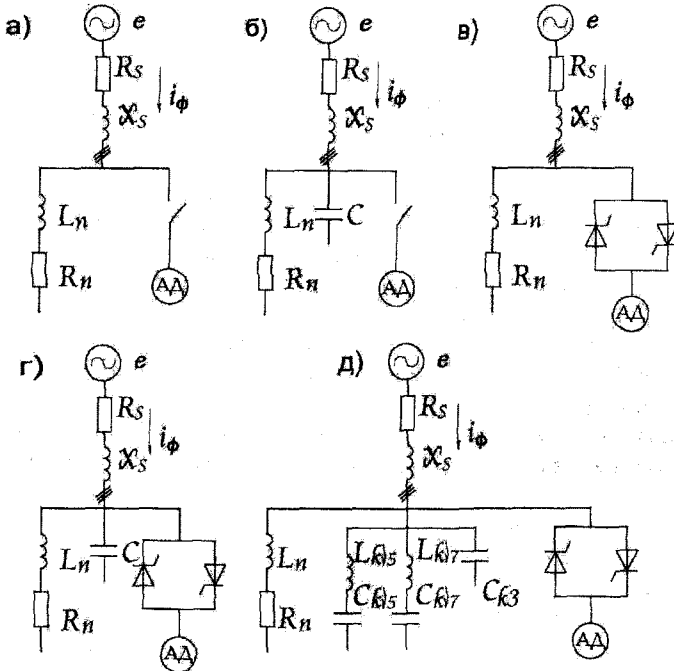


Рис. 4. Схемы трехфазных СЭС с динамическими и статическими нагрузками

Исследования показали, что при первом способе возникают колебания активной мощности, потребляемой из сети, при постоянстве мощности, потребляемой нагрузками. Амплитуда колебаний достигала 12% потребляемой мощности. Второй способ более сложен в реализации, но устраняет этот недостаток и обеспечивает меньший коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения. Оба способа обеспечивают  $\cos \varphi$  на шинах сети равный 1.

В настоящее время электроснабжение потребителей электрической энергии осуществляется переменным трехфазным напряжением 220, 380 и 660 В. Применение переменного тока имеет ряд недостатков: существенное падение напряжения на индуктивных сопротивлениях элементов СЭС, пониженный коэффициент мощности, приводящий к возрастанию потерь электроэнергии и ухудшению эффективности

использования СЭС, трудности в стабилизации качественных показателей электроэнергии и др. Вместе с тем, в настоящее время более 50% электрической энергии преобразуется с помощью полупроводниковых преобразователей в другие виды электрической энергии и, прежде всего, в энергию постоянного тока. Возрастает число потребителей постоянного тока, что исторически вновь делает актуальным применение СЭС постоянного тока.

Учитывая наличие в современных СЭС потребителей постоянного и переменного тока имеет смысл перейти на комбинированные СЭС, в которых потребители переменного тока (осветительная нагрузка, двигатели с тиристорными пускателями, бытовые приборы и т.п.) питаются переменным напряжением 220/380 В, а частотно регулируемые двигатели и другие нагрузки, требующие преобразования частоты питаются от подсистемы постоянного напряжения через обратимый преобразователь напряжения. От этой же сети через простые регуляторы могут питаться печи сопротивления и другие нагрузки. Обратимый преобразователь напряжения может улучшить коэффициент мощности всей СЭС и повысить качество напряжения.

В связи с этим, ставится задача повышения результирующего коэффициента мощности и уменьшения вредного влияния всех потребителей на сеть на основе применения обратимых преобразователей напряжения. Эти идеи высказывались и ранее, но только современный уровень развития элементной базы позволяет с помощью обратимых преобразователей напряжения решать комплексную проблему улучшения общих энергетических показателей СЭС с учетом как влияния других потребителей, так и обеспечения питания нагрузок на стороне постоянного напряжения. Такие преобразователи названы вентильными преобразователями-компенсаторами пассивной мощности.

На рис. 5 приведена функциональная схема комбинированной СЭС.

От сети с номинальным напряжением 380 В питаются: активно-индуктивная нагрузка, асинхронный двигатель (АД), включаемый через тиристорный пускатель (ТП), и ВПК. От ВПК с шин постоянного напряжения 660 В питаются частотно-регулируемые электроприводы, включенные через индивидуальные автономные инверторы, а также другие потребители постоянного напряжения. Для определения необходимой амплитуды активной составляющей синусоидального тока, потребляемой из сети, в блоке расчета амплитуды тока (БРАТ) суммируются активные мощности, потребляемые нагрузками на стороне переменного (без ВПК) и постоянного напряжения, измеряемые датчиками мощности ДМ. Необходимая амплитуда уточняется в зависимости от отклонения выходного напряжения ВПК  $U_d$  от заданного значения. ВПК обеспечивает повышение результирующего  $\cos \varphi$  вплоть до 1 и уменьшение пятой, седьмой и следующих за ними гармоник (примерно до тысячи герц). Для уменьшения более высоких гармоник, возникающих при импульсной модуляции в ВПК, на вводе сети включен маломощный емкостной фильтр (Ф). ВПК выполнен в трехфазном варианте по схеме обратимого преобразователя напряжения.

На рис. 6 приведена модель комбинированной СЭС.

Моделирование данной системы производилось с помощью пакета прикладных программ MatLab 6.5 + Simulink 5.0.

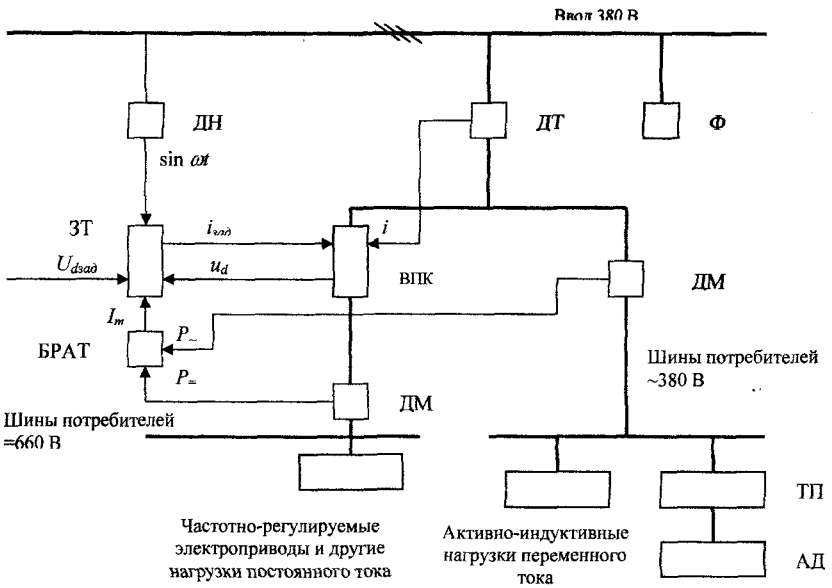


Рис. 5. Функциональная схема комбинированной СЭС

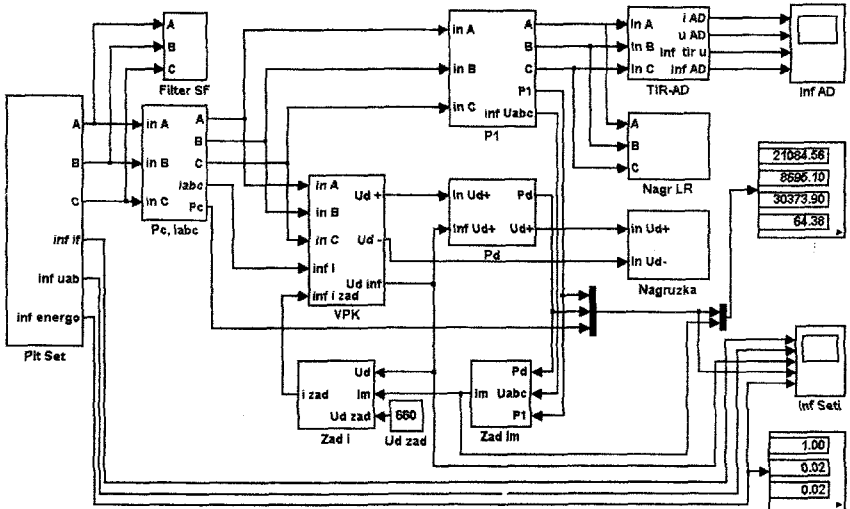
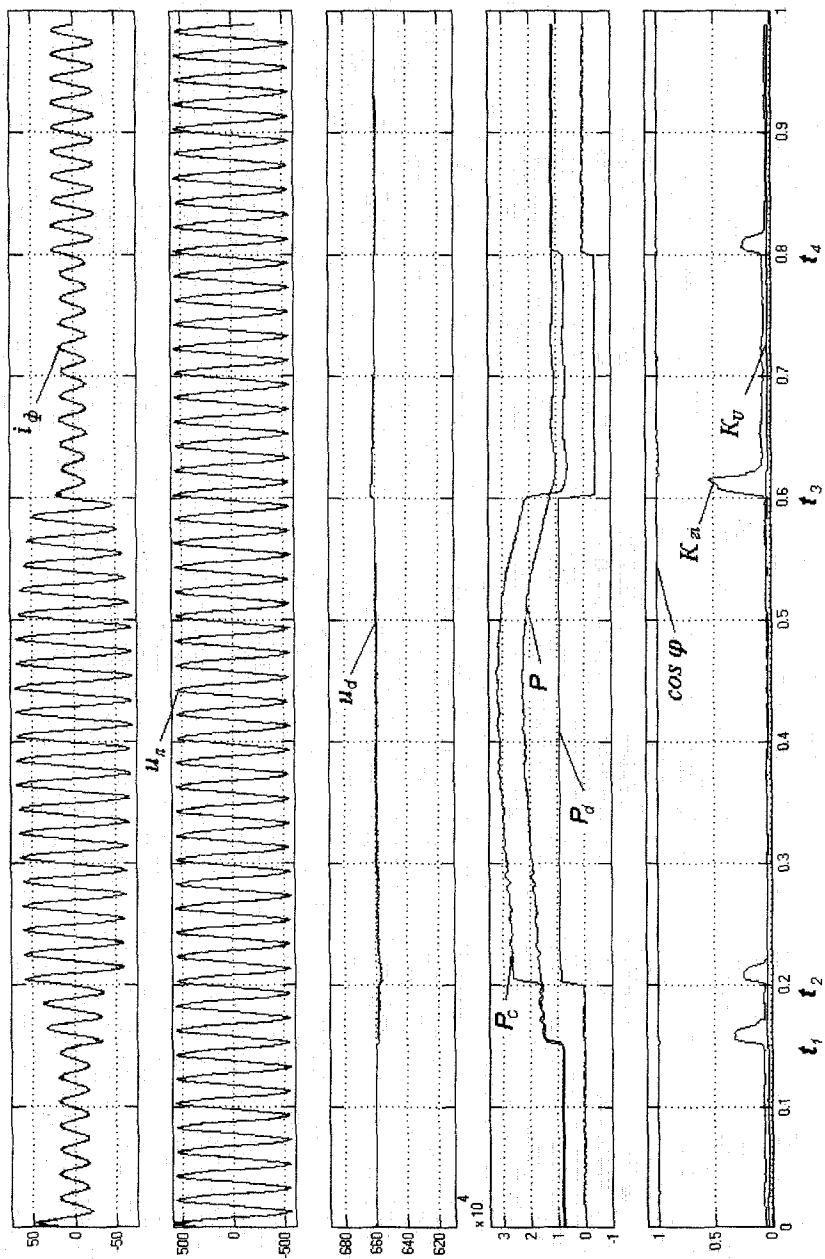
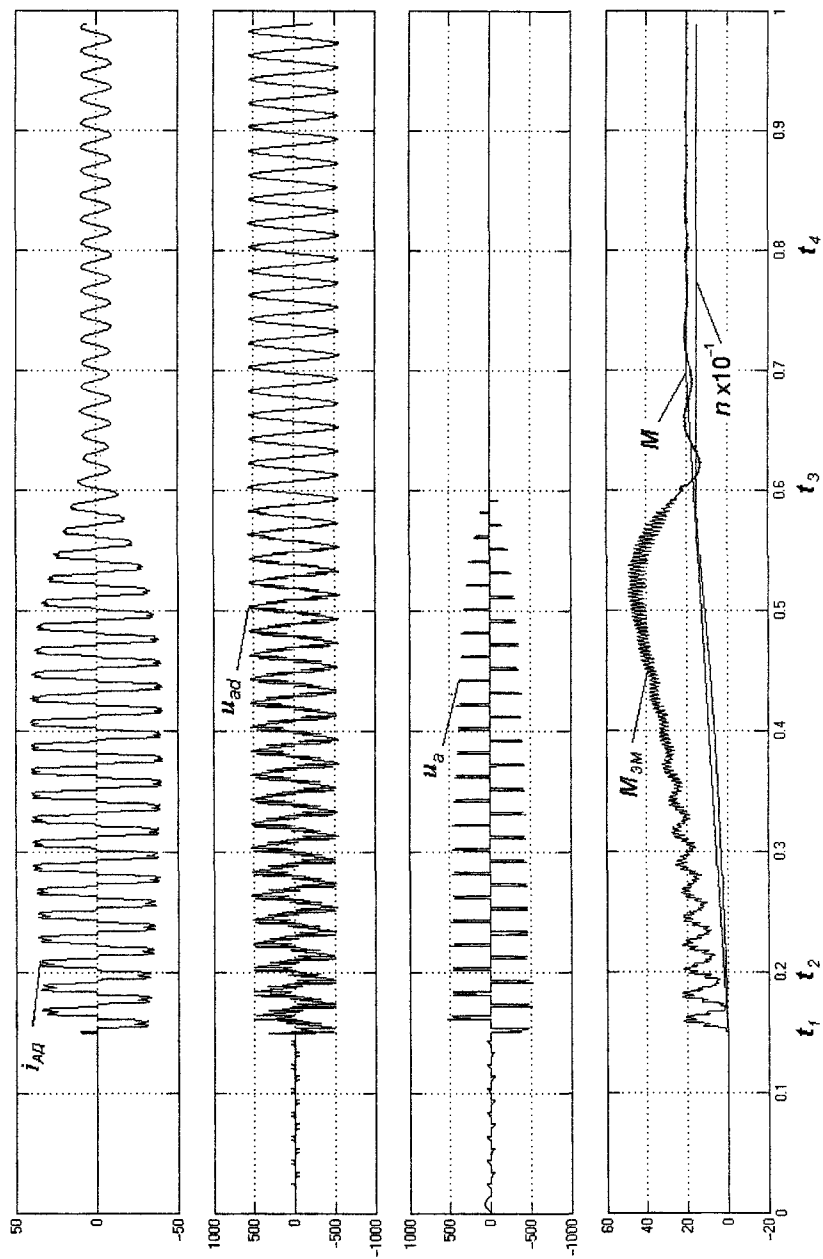


Рис. 6. Модель комбинированной СЭС

На осциллограммах рис. 7 показаны переходные процессы при раздельном измерении активной мощности на стороне постоянного и переменного напряжения, происходящие одновременно в СЭС и в асинхронном электроприводе, пускаемом с помощью ТТ.



a)



б)

Рис. 7. Переходные процессы в СЭС (а) и в асинхронном электроприводе (б), при раздельном измерении мощности

На рис. 7, а приводятся: фазный ток, потребляемый из сети,  $i_{\phi}$ ; линейное напряжение сети  $u_n$ ; выпрямленное напряжение  $u_d$ ; активные мощности – потребляемая на стороне переменного напряжения  $P_{\sim}$ , потребляемая или рекуперлируемая на стороне постоянного напряжения  $P_{\pm}$ ; активная мощность, потребляемая из сети  $P_c$ , а также энергетические показатели –  $\cos \varphi$ , результирующий коэффициент гармоник кривой тока сети  $K_{gi}$  и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ . На осциллограммах рис. 7, б приведены фазный ток, потребляемый АД  $i_{AD}$ , линейное напряжение на двигателе  $u_{AD}$ , напряжение на встречно-параллельно включенных тиристорах пускателя  $u_a$ , скорость вращения двигателя  $n$ , момент нагрузки  $M$  и электромагнитный момент  $M_{эм}$ .

До момента  $t_1$  к сети на стороне переменного напряжения подключена неизменная активно-индуктивная нагрузка. В момент  $t_1$  тиристорным пускателем пускается АД, в момент  $t_2$  дополнительно подключается нагрузка на стороне постоянного напряжения, в момент  $t_3$  происходит рекуперативное торможение на стороне постоянного напряжения, а после момента  $t_4$  остаются подключенными к сети активно-индуктивная нагрузка и нагруженный АД в установившемся режиме.

Следует отметить, что раздельное измерение активной мощности на стороне постоянного и переменного напряжения принципиально необходимо. При применении системы управления ВПК, основанной на измерении суммарной активной мощности на вводе, возникали автоколебания активной мощности, потребляемой из сети.

Для более детального исследования комбинированной СЭС и выявления показателей при изменении нагрузки на стороне переменного напряжения была использована теория планирования эксперимента. Анализ подвергалась упрощенная схема, содержащая тиристорный регулятор, через который питалась активно-индуктивная нагрузка и ВПК, питающий эквивалентную активную нагрузку на стороне постоянного тока. Полученное уравнение регрессии для  $Y_1 = K_U$  в кодированных величинах выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 0,61667 - 0,03131 \cdot x_1 - 0,11213 \cdot x_2 + 0,04728 \cdot x_3 - \\
 & - 0,04751 \cdot (x_1^2 - 0,73) + 0,09803 \cdot (x_2^2 - 0,73) - \\
 & - 0,02382 \cdot (x_3^2 - 0,73) + 0,04375 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,05625 \cdot x_2 \cdot x_3 - \\
 & - 0,02375 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,03875 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3,
 \end{aligned}$$



где  $x_1$  – кодированное значение угла управления  $\alpha$ ,  $x_2$  – кодированное значение  $R_n / X_s$ ,  $x_3$  – кодированное значение  $\cos \varphi_n$ .

На рис. 8 приведено семейство поверхностей, отображающих зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения от параметров нагрузки и угла управления

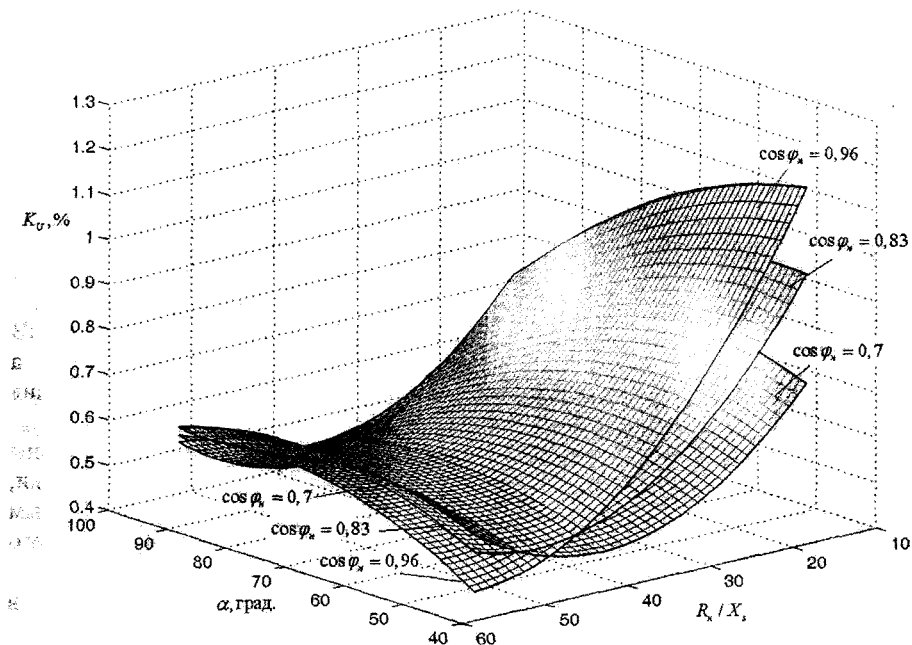


Рис. 8. Семейство поверхностей, отображающих зависимость коэффициента  $K_U$  от параметров нагрузки и угла управления

Для детального исследования влияния параметров ВПК на синусоидальность напряжения комбинированной СЭС, действующее значение тока, потребляемого из сети ВПК, и среднюю частоту коммутации в нем также была использована теория планирования эксперимента. Исследование влияния характера нагрузок на стороне переменного и постоянного напряжения на электромагнитные процессы в ВПК показало:

1) действующее значение тока, потребляемого ВПК, при одинаковом коэффициенте мощности потребителей на стороне переменного тока не зависит от характера нагрузок;

2) ток, проходящий через конденсатор фильтра зависит, от характера нагрузок и даже при плохом коэффициенте искажений ( $\nu = 0,92$ ) увеличивается примерно на 30%;

3) силовая часть обычного активного выпрямителя может обеспечить работу в режиме ВПК при соответствующем уменьшении активной нагрузки на стороне постоянного тока; при этом лишь увеличивается нагрузка на конденсаторы по действующему току на 15–30%.

**Приложения к диссертационной работе.** В 4 приложениях приведены расчеты переходных процессов и расчеты, выполненные для реализации планирования экспериментов и документы о внедрении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено новое техническое решение актуальной научно-технической задачи – обоснована целесообразность построения комбинированной системы электроснабжения постоянного и переменного напряжения на основе применения вентильных преобразователей-компенсаторов, обеспечивающих питание нагрузок постоянным током и одновременно управляемую компенсацию пассивной мощности в сети переменного напряжения. При этом получены следующие основные результаты.

1. На основе моделирования подтверждено, что в СЭС напряжением до 1 кВ наблюдаются существенные нарушения синусоидальности напряжения, а коэффициент мощности далек от 1 в значительной степени из-за применения нагрузок, включаемых через тиристорные ключи.

2. С помощью пакета прикладных программ MatLab+Simulink исследованы современные сложные системы электропитания комплексной нагрузки, содержащей электроприводы переменного тока с частотным и фазовым регулированием, а также другие потребители как переменного, так и постоянного тока.

3. Применение теории планирования эксперимента позволило в аналитическом виде представить результаты численных исследований и на основе построения пространственных изображений с достаточной точностью оценить влияние различных факторов на коэффициент мощности и показатели качества электрической энергии.

4. При применении конденсаторных батарей для параллельной компенсации в однофазных и трехфазных СЭС, питающих нагрузки, включенные через тиристорные регуляторы, наблюдается резкое увеличение гармоник тока и ухудшение синусоидальности напряжения питающей сети.

5. Применение обратимых преобразователей напряжения для питания частотно-регулируемых электроприводов позволяет одновременно улучшить энергетические показатели СЭС переменного тока, доведя  $\cos \varphi$  в пределе до 1, и удовлетворить требования ГОСТа на качество электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения.

6. Разработаны регрессионные модели для определения  $\cos \varphi$  и коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения сети, средней частоты коммутации транзисторов, действующего значения тока потребляемого

ВПК, обеспечивающие адекватность виртуальным моделям и позволяющие определить параметры силовой схемы ВПК.

7. Разработана структура системы управления ВПК, обеспечивающая управляемую компенсацию пассивной мощности на стороне переменного напряжения и достаточно стабильное напряжение на стороне постоянного напряжения, основанная на раздельном измерении суммарных активных мощностей всех нагрузок на стороне постоянного и переменного напряжения, расчете требуемой амплитуды синусоидального тока, потребляемого из сети, и его коррекции при отклонении выпрямленного напряжения.

8. Применение ВПК пассивной мощности более целесообразно, чем применение специализированных вентильных компенсаторов.

9. В связи с широким внедрением в промышленность устройств силовой электроники целесообразно развитие комбинированных СЭС, напряжением до 1 кВ, осуществляющих электроснабжение как на переменном, так и на постоянном токе.

10. Результаты теоретических исследований и разработанные модели приняты к внедрению в учебный процесс ЮУрГУ в курсах «Основы энергосберегающей энергетической электроники» и «Системы электроснабжения на основе устройств силовой преобразовательной техники», а рекомендации по применению компенсирующих устройств переданы в ОАО «Южуралэлектромонтаж».

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Хохлов Ю.И., Преображенский К.А. Энергосбережение в системах с полупроводниковыми регуляторами напряжения на основе применения компенсирующих устройств // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – № 11(27). – С. 3–8.
2. Хохлов Ю.И., Преображенский К.А. Энергосбережение в системах с тиристорными регуляторами напряжения и компенсирующими устройствами // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых. 17-20 декабря 2003г. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – С. 175–176.
3. Хохлов Ю.И., Преображенский К.А. Проблемы повышения коэффициента мощности в сетях напряжением 0,4 кВ с асинхронными двигателями и тиристорными регуляторами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. 4. – 1(30). – С. 41–47.
4. Преображенский К.А., Слободянюк А.А., Хохлов Ю.И. Электромагнитные процессы в компенсированных системах электроснабжения с мягким тиристорным управлением // Материалы VII Симпозиума «Электротехника. 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для

- передачи и распределения электроэнергии». – М.: Ассоциация ТРАВЭК, 2003. – Т.1. – С. 307–312.
5. Хохлов Ю.И., Гельман М.В. Преображенский К.А. Комплекс виртуальных лабораторных работ по электроснабжению и энергетической электронике // Труды Второй всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – М.: ИПУ РАН, 2004. – С. 1940–1944 (электронное издание).
  6. Преображенский К.А. Применение теории планирования эксперимента при математическом моделировании систем электроснабжения // Материалы международной научно-технической конференции. XII Бенардосовские чтения. Состояние и перспективы развития электротехнологии.– Иваново: ИЭУ, 2005. – Т.1. – С. 74.
  7. Гельман М.В., Преображенский К.А., Хохлов Ю.И. Комбинированные системы электроснабжения переменного и постоянного напряжения // Материалы VIII Симпозиума «Электротехника. 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии». Тезисы докладов. – М.: Ассоциация ТРАВЭК, 2005. – С. 167–168.
  8. Гельман М.В., Хохлов Ю.И., Преображенский К.А. Повышение энергетических показателей системы электроснабжения управляемых электроприводов переменного тока и прочих нагрузок постоянного и переменного тока // Труды международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока ЭППТ – 05». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С. 223–226.
  9. Хохлов Ю.И., Преображенский К.А. Повышение энергетических показателей низковольтных комбинированных электрических сетей на основе применения активных преобразователей // XXV Российская школа по проблемам науки и технологии, посвященная 60-летию Победы: Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2005. – С. 45.

Преображенский Кирилл Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ  
КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 11.10.2004. Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 319/48.

---

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ, 454080, г. Челябинск,  
пр. им. В.И. Ленина, 76.