

На правах рукописи

КОЖИН Алексей Сергеевич

**«ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ: ПИТАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК И ГЕНЕРАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ»**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород 2013

Работа выполнена на кафедре «Электропривода, автоматики и управления в технических системах» Воронежского государственного технического университета.

Научный руководитель: – **Зайцев Александр Иванович** –
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: – **Онищенко Георгий Борисович** –
доктор технических наук, профессор;
ФБГОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет»,
профессор кафедры «Электрические системы»;
– **Тихомиров Владимир Анатольевич** –
кандидат технических наук, доцент;
ФБГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматизация».

Ведущая организация – ООО «НИИ МЕХАНОТРОНИКИ-АЛЬФА-НЦ» (г. Воронеж).

Защита состоится "20" декабря 2013 г. в 16 часов 00 минут в аудитории № 1307 на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 в Нижегородском государственном техническом университете (603950, ГСП - 41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФБГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 603950, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, ФБГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.02.

Автореферат разослан "18" ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.165.02,
к.т.н. доцент



А.С. Плехов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Электроэнергия является одним из видов продукции, транспортировку которой осуществляют за счет расхода определенной части самой продукции, поэтому потери электрической энергии при ее передаче неизбежны.

Кроме этого необходимого «технологического расхода» во всех элементах системы электроснабжения возникают существенные дополнительные потери активной мощности и энергии, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью, передаваемой потребителям по линиям электропередачи.

На создание реактивной мощности топливо практически не расходуется, но эта мощность загружает электрические сети, что приводит:

- к возрастанию потоков реактивной мощности в линиях электропередачи межсистемных, системообразующих и распределительных электрических сетей;

- к возникновению дефицита реактивной мощности в узлах нагрузки и, как следствие, к снижению напряжения на шинах нагрузок и подстанций распределительных электрических сетей и к снижению запаса статической устойчивости нагрузки по напряжению;

- к ограничению пропускной способности линий электропередачи и трансформаторных подстанций по активной мощности из-за необоснованной их загрузки реактивной мощностью;

- к существенному росту потерь активной мощности в электрических сетях электроэнергетических систем и систем электроснабжения потребителей и значительному ухудшению технико-экономической эффективности сетевого бизнеса;

- к чрезмерной чувствительности распределительной сети и сети потребителей к возмущениям и к неустойчивости даже при незначительных возмущениях.

Причиной избыточных потоков реактивной мощности и, соответственно, проблем с напряжением в распределительных электрических сетях являются потребители, которые из-за отсутствия нормативных требований не осуществляли собственными источниками компенсацию реактивной мощности.

Без участия потребителей в компенсации собственного потребления реактивной мощности уже невозможно обеспечить технически и экономически обоснованный баланс реактивной мощности в электроэнергетических системах и системах электроснабжения потребителей.

Ежегодно при передаче теряется огромное количество электроэнергии.

В Японии 5% от общего объема, в Западной Европе - 4%, США - 7-9%. Больше всего электроэнергии теряется в нашей стране - 14%, что в среднем составляет 133577 ГВт·ч.

Имеются два пути снижения потерь электроэнергии: строительство электростанций для покрытия потерь активной энергии или энергосбережение при

установке компенсирующих устройств в местах потребления реактивной мощности индуктивного характера.

При системном анализе взаимодействия всех звеньев энергосистемы при производстве, передаче, распределении и потреблении электроэнергии и возможностей элементной базы силовой электроники на базе полностью управляемых силовых вентилей (IGBT, IGCT) выявлены новые свойства выпрямителей с искусственной коммутацией – питание потребителей активной энергией и генерация реактивной мощности емкостного характера.

При этом наибольший экономический эффект снижения потерь активной энергии во всех токоведущих элементах может быть достигнут при совмещении указанных свойств в одном устройстве (подобно синхронным приводным двигателям).

Такие устройства получили название «компенсационные преобразователи» (КП).

Проведенные расчеты показывают, что возможный прирост объемов генерации электроэнергии для компенсации потерь получаются почти на порядок дороже, чем затраты на мероприятия по энергосбережению. Кроме того, капитальные затраты на установку компенсационных преобразователей окупаются менее чем за один год.

Разработке и исследованию компенсационных преобразователей двойного назначения для питания регулируемых потребителей постоянного тока и являющихся составной частью всех регулируемых источников для питания устройств генерации переменного тока с отличными параметрами от сетевого напряжения (двухзвенные преобразователи частоты в электроприводах переменного тока, активные выпрямители в электрических сетях) посвящена данная диссертационная работа.

Работа направлена на решение задачи приоритетного направления по модернизации и технологическому развитию России в области энергоэффективности и энергосбережения.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.09.03. – «Электротехнические комплексы и системы». Диссертационная работа соответствует формуле специальности в части исследования системы передачи, преобразования и использования электрической энергии, компонентами которой являются соответственно питающая сеть, статический полупроводниковый компенсационный преобразователь и нагрузка. В результате анализа взаимодействия данных компонентов выявлены новые качества компенсационного преобразователя, как устройства, совмещающего в себе две функции: питание технологических установок и генерация реактивной мощности. Показана степень эффективности его применения в системах ЧР АЭП турбомеханизмов. Разработанные в диссертации методы и сформулированные научные положения соответствуют области исследования специальности по компьютерному моделированию компонентов электротехнических систем (п. 1), разработке алгоритмов эффективного управления данными компонентами (п.

3), исследованию их работоспособности и качества функционирования в различных режимах (п. 4).

Цель работы заключается в исследовании возможности использования ресурсов компенсационного преобразователя с искусственной коммутацией для получения дополнительной экономии электроэнергии за счет генерации им реактивной мощности емкостного характера и последующего его применения в различных секторах экономики.

Задачи работы. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи исследования:

- разработка теоретического описания принципов работы КП;
- анализ принципов работы КП методом компьютерного моделирования;
- разработка, изготовление и экспериментальное исследование лабораторного образца КП;
- анализ результатов компьютерного и лабораторного исследования работы КП, построение его основных характеристик;
- исследование возможности построения преобразователя частоты на базе компенсационного преобразователя и автономного инвертора напряжения (АИН) или тока (АИТ);
- технико-экономическое обоснование применения компенсационного преобразователя в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе (ЧР АЭП);

Методы исследования.

Для решения поставленных задач в диссертации использованы структурные методы автоматического регулирования, теория электрических цепей, методы моделирования динамических процессов на ЭВМ, сравнение с результатами, полученными другими исследователями.

Достоверность и обоснованность результатов и научных положений диссертационной работы, конкретных выводов и рекомендаций, адекватность предложенных методов и методик подтверждены положительными результатами сравнительного анализа данных моделирования, эксперимента и расчета отдельных узлов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- проведено теоретическое исследование электромагнитных процессов в компенсационном преобразователе методом коммутационных разрывных функций (КРФ), установившее связь между его входными, выходными и внутренними параметрами и принципом управления силовыми вентилями;
- в соответствии с теоретическим подходом к исследованию компенсационного преобразователя разработана его компьютерная модель, позволяющая просто и эффективно исследовать его характеристики в различных режимах работы;
- предложена методика определения основных параметров силовой схемы КП, особенностью которой является выбор емкости конденсатора узла защиты

от коммутационных перенапряжений.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- предложена структурная схема системы управления КП (СУ КП), реализующая принцип управления преобразователем в соответствии с теоретическим исследованием;

- разработан программируемый формирователь импульсов управления КП на основе микроконтроллера ATmega 16, являющийся главным функциональным узлом системы управления при ее практической реализации;

- проведено теоретическое исследование возможности построения преобразователя частоты (ПЧ) на базе КП и АИН или АИТ, позволяющей устранить недостатки существующих преобразователей частоты;

- разработан и изготовлен лабораторный образец КП, успешные испытания которого подтвердили экономическую целесообразность применения преобразователя в различных секторах экономики;

- произведен расчет экономической эффективности применения КП в качестве источника питания ЧР АЭП турбомеханизмов с одновременной компенсацией реактивной мощности в системе электроснабжения, позволяющий определить сроки его окупаемости.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты исследований компенсационных преобразователей использованы в отчете о научно-исследовательской работе «Развитие теоретических основ построения альтернативных источников реактивной мощности с целью энергосбережения в распределительных сетях и узлах нагрузки», Б 13/11, № гос. регистрации 01201155693, ВГТУ, Воронеж, 2011.

В феврале 2013 работа «Энергосберегающий компенсационный преобразователь для частотно-регулируемого электропривода переменного тока» была награждена дипломом и грантом регионального межвузовского конкурса инновационных проектов «Кубок инноваций», учрежденного правительством Воронежской области.

При выполнении работы автором разработан и изготовлен учебный стенд по энергосберегающей технологии преобразования переменного тока в постоянный для проведения учебных занятий по курсу «Преобразовательная техника» и выполнения исследований магистрами и аспирантами на кафедре ЭАУТС ВГТУ.

При создании учебного стенда с компенсационным преобразователем применены современные IGBT-модули типа МДТКИ-100-12-2К / МТКИД-100-12-2К. Опытные образцы модулей изготовлены ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск по заказу ВГТУ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской студенческой научно-технической конференции Инженерные идеи XXI века (Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2010), международной научной конференции Информационные технологии в связи, вычислительной техники и энергетики (Воронеж:

МИКТ, 2010), III-й Международной научной заочной конференции Актуальные вопросы современной техники и технологии (Липецк, 29 января 2011 г.), Всероссийской научно-практической конференции-форума молодых ученых и специалистов Современная российская наука глазами молодых исследователей (Красноярск: НИЦ, 2011), Матеріали 7-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. Конф Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ - 2011» (Севастополь 11 — 15 квітня 2011 р.) Всероссийской конференции Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве (Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2011), региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Инновационные разработки молодых ученых Воронежской области на службу региона" (в рамках конкурса по программе "Участник молодежного научно-инновационного конкурса" (У.М.Н.И.К.) поддерживаемого Воронежским инновационно-технологическим центром (ЗАО "ВИТЦ"))).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 без соавторов и 3 в изданиях рекомендованных ВАК [1-3].

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателем предложены: [1,5,7] – компьютерное моделирование установившихся режимов и коммутационных процессов в КП; [6,8,9,10,11,12,14] – анализ существующих систем преобразования переменного тока и возможности их усовершенствования путем применения КП.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 179 страницах, списка литературы из 112 наименований; содержит 8 таблиц, 97 рисунков и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются: актуальность темы диссертации, ее цель и основные задачи, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу существующих средств компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения и регулирования производительности промышленных технологических установок.

В настоящее время основным средством компенсации реактивной мощности на предприятиях являются батареи силовых конденсаторов, подключаемые параллельно к электросети (поперечная компенсация).

К их недостаткам следует отнести:

- отсутствие плавного автоматического регулирования отдаваемой в сеть реактивной мощности;
- негативное воздействие перенапряжений и высших гармоник;

- вероятность возникновения резонансных и автоколебательных процессов при определенных сочетаниях с индуктивностью элементов системы электроснабжения.

Современным средством регулирования производительности технологических установок на сегодняшний день являются управляемые выпрямители с принудительным формированием тока и напряжения посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это «активные выпрямители» и «корректоры коэффициента мощности», которые кроме регулирования активной мощности на выходе обеспечивают и генерацию неактивных составляющих мощности. Однако имеются проблемы использования их в электроустановках большой мощности.

К основным недостаткам таких устройств относятся:

- большое количество силовых IGBT-транзисторов и возможность возникновения на закрытых транзисторах значительных импульсных перенапряжений;

- сложность системы управления транзисторами ШИМ - выпрямителя, которая требует информации не только о величине токов и напряжений, но и их фазовом сдвиге;

- наличие электролитических конденсаторов с большой емкостью и высоким рабочим напряжением.

В результате анализа недостатков существующих средств были определены основные качества, совмещение которых в одном устройстве позволит повысить эффективность преобразования электроэнергии применительно к регулируемому электроприводу. В свою очередь, анализ сформулированных качеств, с применением системного подхода и учетом их объединения в одном устройстве, определил статический полупроводниковый компенсационный преобразователь – устройство преобразования переменного тока, совмещающее в себе функции компенсации реактивной мощности и регулирования питания технологических установок.

Основным применением КП в узлах нагрузки является регулируемый электропривод и технологические установки постоянного и переменного тока, в распределительных сетях – регулируемые источники реактивной мощности емкостного или индуктивного характера.

При этом эффективность работы КП растет с увеличением тока, потребляемого нагрузкой во всем диапазоне регулирования (высокомомментный электропривод, индукционные печи). В случае большого числа потребителей малой и средней мощности наиболее эффективным будет установка КП на определенную часть из них таким образом, чтобы для данного узла нагрузки выполнялся баланс производства и потребления реактивной мощности (кластер потребителей с КП).

Вторая глава посвящена теоретическому анализу работы компенсационного преобразователя, принципиальная схема силовой части которого показана на рис. 1.

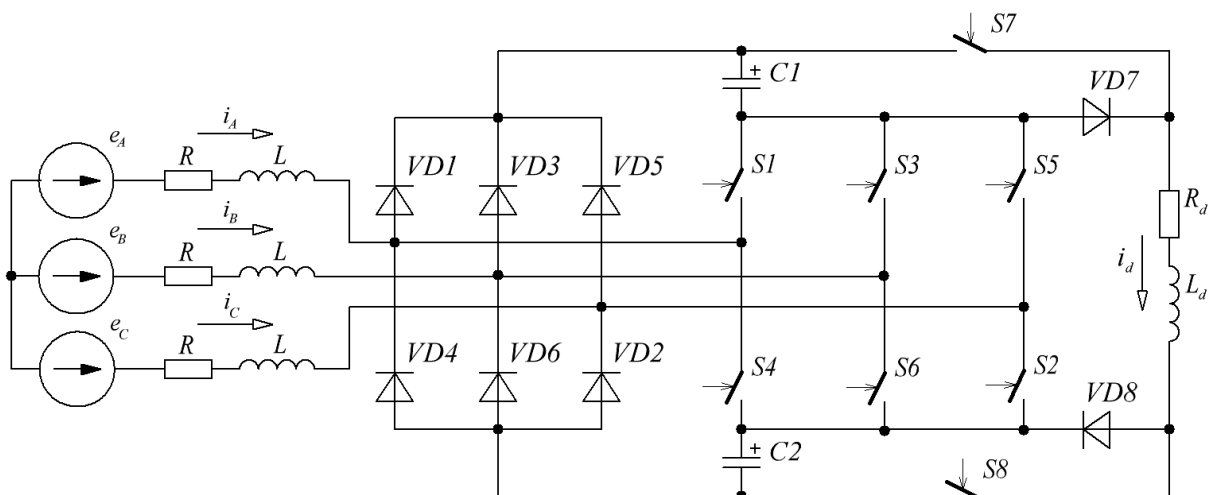


Рис. 1. Принципиальная схема силовой части КП

Основу КП составляет трехфазный силовой мост, состоящий из полностью управляемых ключей $S1 - S6$, в качестве которых выступают IGBT или IGCT, в зависимости от работы преобразователя соответственно в качестве источника напряжения или тока. Элементы $C1, C2, VD1 - VD8$ и ключи $S7, S8$ (IGBT) являются вспомогательными, образуя два идентичных узла защиты от коммутационных перенапряжений (УЗП). Источник энергии (питающая сеть) представлен на схеме трехфазной системой ЭДС e_A, e_B, e_C с собственной индуктивностью L и активным сопротивлением R соответственно. Нагрузка представлена активно-индуктивной составляющей R_d, L_d , характерной для большинства потребителей.

Принцип работы КП заключается в фазовом управлении силовыми вентилями относительно точки их естественной коммутации. Применение полностью управляемых вентилей позволяет реализовать в КП режим работы при опережающих углах управления. В этом режиме КП выполняет одновременно две функции: регулирование выходного напряжения (тока) и генерирование в питающую сеть реактивной мощности емкостного характера, компенсируя индуктивную реактивную мощность в сети.

Удобным инструментом математического описания работы силовых ключей КП являются коммутационные разрывные функции (КРФ), позволяющие представить все величины в виде рядов Фурье. При этом существуют две формы записи КРФ, одна из которых (1) служит для анализа переходных режимов (коммутаций вентилей), а другая (2) – для анализа квазиустановившихся состояний.

$$F_{S1} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [1(t_k) - 1(t_k + \lambda_k)], \quad (1)$$

$$F_{S1} = \sum_{k=1}^{\infty} [1(t_k) - 1(t_k + \lambda_k)], \quad (2)$$

где

$$1(t_k) = \begin{cases} 0, & t < t_k \\ 1, & t \geq t_k \end{cases} \quad (3)$$

t_k – момент включения ключа S1 ;

λ_k – длительность проводящего состояния ключа, в данной схеме:

$$\lambda_k = \lambda = T/3 = 0,02/3 \text{ [с]} = 2\pi/3 \text{ [с}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

В режиме с опережающими углами управления в каждом полумосте КП применяется узел защиты от коммутационных перенапряжений (УЗП), состоящий из конденсатора, неуправляемого диодного выпрямителя и управляемого вентиля. Анализ протекания коммутации в КП с применением метода КРФ показал, что УЗП выполняет две важных функции:

- разделение контуров протекания токов входящей и выходящей из работы фазы;

- плавный перевод в нагрузку энергии индуктивности фазы, выходящей из работы.

В условиях опережающих углов управления, когда напряжение выходящей из работы фазы выше напряжения входящей, выполнение первой функции обеспечивает отсутствие перенапряжений, связанных с протеканием тока короткого замыкания в контуре коммутации, а второй – снижение потерь энергии при коммутации в индуктивностях фаз питающей сети. В результате улучшаются условия работы силовых ключей компенсационного преобразователя, снижается коэффициент нелинейных искажений (КНИ, THD) сетевого напряжения и тока, увеличивается жесткость внешних характеристик преобразователя и КПД системы «питающая сеть - КП».

Для режимов работы КП с отстающими и опережающими углами управления с учетом коммутации составлены выражения логической связи коммутационных функций $F_{S1} - F_{S6}$ силовых вентилях и F_{S7}, F_{S8} управляемых вентилях УЗП (5).

$$\begin{aligned} F_{S7}(\alpha_c) &= F_{S1}(\alpha_c) \cdot \bar{F}_{S1}(\alpha_c - \gamma_1) \oplus F_{S3}(\alpha_c) \cdot \bar{F}_{S3}(\alpha_c - \gamma_1) \oplus F_{S5}(\alpha_c) \cdot \bar{F}_{S5}(\alpha_c - \gamma_1), \\ F_{S8}(\alpha_c) &= F_{S2}(\alpha_c) \cdot \bar{F}_{S2}(\alpha_c - \gamma_1) \oplus F_{S4}(\alpha_c) \cdot \bar{F}_{S4}(\alpha_c - \gamma_1) \oplus F_{S6}(\alpha_c) \cdot \bar{F}_{S6}(\alpha_c - \gamma_1) \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ входных характеристик КП показал, что работа с опережающими углами управления, КП служит генератором реактивной мощности емкостного характера в питающую сеть, в то время как обычные тиристорные выпрямители, работающие с отстающими углами управления, являются потребителями реактивной мощности индуктивного характера из питающей сети.

Применение КП в ПЧ для ЧР АЭП турбомеханизмов в качестве регулируемого источника питания АИН или АИТ позволяет устранить недостатки существующих ПЧ с неуправляемыми выпрямителями и выпрямителями с естественной коммутацией, а именно:

- решить проблему компенсации реактивной мощности на стороне потребителя, не прибегая к дополнительной установке УКРМ;
- одновременно с режимом компенсации реактивной мощности, выполнять регулирование производительности технологической установки;
- существенно снизить нагрузку на силовые конденсаторы звена постоянного тока в АИН в режимах работы, отличных от номинального;
- существенно сократить потери активной мощности в электродвигателях и системе электроснабжения;
- улучшить качество тока и напряжения на входе и выходе ПЧ с режимом сокращением мощности входных и выходных фильтров;
- снизить нагрузку на изоляцию электродвигателя, значительно увеличив его срок службы.

Для выполнения указанных задач необходимо разделить функции регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения (тока) и генерируемой в сеть реактивной мощности между КП и инвертором. С этой целью предложена структура системы управления (СУ) входными и выходными параметрами ПЧ на основе КП и АИН (рис. 2) или АИТ (аналогична).

Основные блоки СУ ПЧ на основе КП с АИН следующие:

- СУ КП, выполняющая управление непосредственно КП, входным сигналом для которой выступает напряжение U_y на выходе звена постоянного тока для питания АИН;
- СУ АИН, выполняющая управление непосредственно АИН, входным сигналом для которой выступает частота f_y напряжения U на выходе инвертора;
- регуляторы напряжения РН и частоты РЧ, корректирующие сигналы управления для СУ КП и СУ АИН для обеспечения заданных динамических характеристик ПЧ;

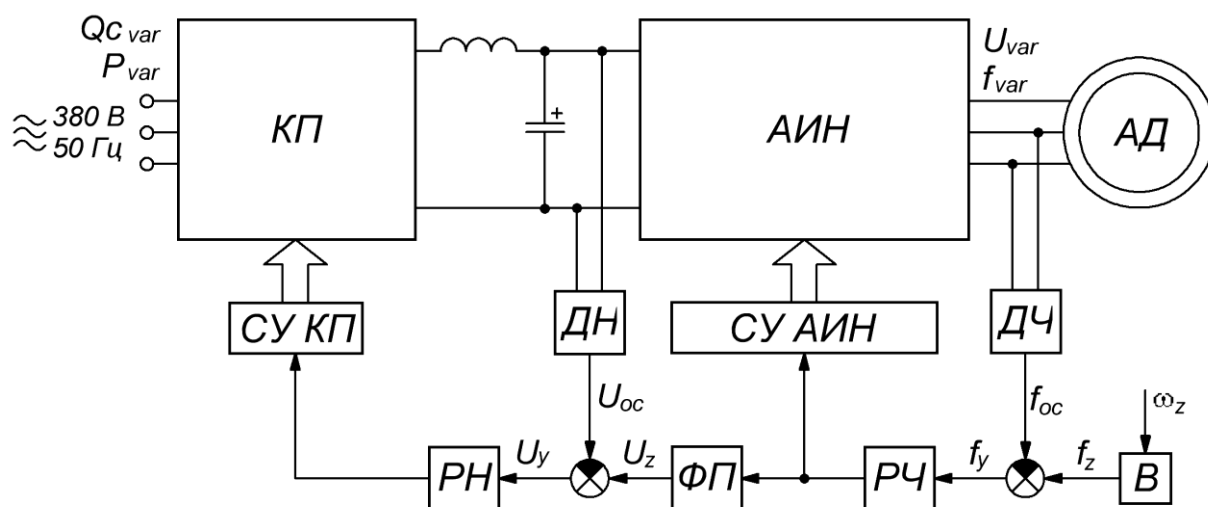


Рис. 2. Структурная схема ПЧ на основе КП с АИН

- датчик напряжения ДН звена постоянного тока для формирования сигнала ошибки по напряжению U_{oc} цепи отрицательной обратной связи (ООС) управления КП;

- датчик частоты ДЧ выходного напряжения U для формирования сигнала ошибки по частоте f_{oc} цепи ООС управления АИН;

- функциональный преобразователь ФП, обеспечивающий преобразование сигнала задания по частоте f_z для СУ АИН в сигнал задания по напряжению U_z для СУ КП на основе соответствующего закона управления (в данном случае скалярного для вентиляторной нагрузки);

- вычислитель В, определяющий значение частоты f_z напряжения на выходе АИН на основе угловой частоты вращения двигателя ω_z , выступающей входным сигналом задания для СУ ПЧ;

- асинхронный двигатель АД, как объект управления.

С целью улучшения качества потребляемого тока и выходных параметров инвертора в ПЧ на основе КП с АИН или АИТ предложены специальные методы управления силовыми вентилями КП и АИН (АИТ) – трапецеидальная широтно-импульсная модуляция и метод выборочного исключения гармоник. Данные методы позволяют существенно уменьшить амплитуды наиболее весомых гармоник в спектре напряжения и тока на входе и выходе ПЧ с КП и АИН (АИТ) при минимуме динамических потерь в силовых вентилях. При этом пассивные фильтры значительно уменьшаются по габаритам и стоимости.

В третьей главе проведено компьютерное моделирование и лабораторное исследование работы КП. Для исследования характеристик КП методом компьютерного моделирования, была выбрана среда Simulink и ее приложение SimPowerSystems. Разработанная компьютерная модель КП позволяет изучать различные режимы его работы, а также оценивать влияние различных параметров на входные и выходные характеристики преобразователя (рис. 3).

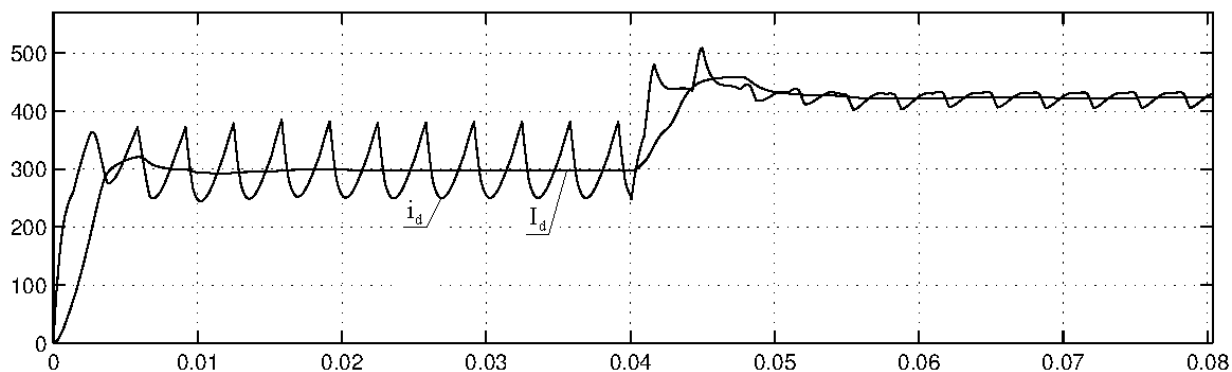


Рис. 3. Осциллограмма среднего $I_d(t)$ и мгновенного $i_d(t)$ значений выходного тока КП при работе на RL-нагрузку и скачкообразном изменении угла управления от -45 до 0 эл. град., масштаб по оси тока – 100 А/дел, по оси времени – $0,01$ с/дел.

Результатами исследования работы КП методом компьютерного моделирования являются следующие выводы:

- при опережающих углах управления входные и выходные параметры КП определяются углом управления и изменяются аналогично параметрам тиристорных выпрямителей с отличием в характере реактивной мощности, как это было выявлено при теоретическом анализе КП в гл. 2;

- качество работы УЗП определяется значением емкости конденсатора и угла первого этапа коммутации;

- заряженный конденсатор УЗП служит потенциальным барьером, исключая протекание тока короткого замыкания в контуре коммутации и способствующим тем самым передаче энергии коммутации в нагрузку;

- для каждого значения емкости конденсатора УЗП существует значение угла первого этапа коммутации, определяющее минимальные при данной емкости и параметрах источника и нагрузки перенапряжения в фазах на входе КП и уровень напряжения на самом конденсаторе;

- УЗП увеличивает жесткость внешних характеристик КП, как это было получено в результате теоретического анализа в гл. 2;

- наиболее удобным способом управления работой УЗП является контроль напряжения на его конденсаторах;

- выбор емкости конденсаторов УЗП должен осуществляться на основе величины энергии, запасаемой в контуре коммутации в случае протекания в нем тока короткого замыкания, то есть в случае отсутствия УЗП.

Компьютерное моделирование ЧР АЭП аппарата воздушного охлаждения на базе КП и АИН показало, что электропривод способен обрабатывать различные значения сигнала задания скорости. Точность отработки лежит в требуемом диапазоне со значительным запасом. При этом значения момента двигателя отвечают вентиляторному характеру зависимости момента нагрузки от скорости. В переходных режимах момент не превышает допустимые значения по перегрузке.

Экспериментальный образец КП разработан и изготовлен непосредственно автором на кафедре ЭАУТС ВГТУ в виде учебного стенда для лаборатории промышленной электроники. Все основные погрешности результатов экспериментального исследования КП связаны с присущими реальным элементам нелинейностями, отклонениями в исполнении, классами точности приборов и т.п.

В результате сравнения кривых, полученных методом компьютерного моделирования и лабораторных испытаний КП, обнаружено, что характер изменения параметров в том и другом случае аналогичен.

Главным результатом испытаний КП является подтверждение его способности к выполнению одновременно двух функций: питание технологической установки и генерация реактивной мощности емкостного характера в питающую

сеть. При этом уровень генерируемой реактивной мощности зависит от угла управления, в свою очередь определяемого технологической нагрузкой потребителя. Учитывая, что практически все регулируемые технологические установки работают не в номинальном режиме, можно считать применение КП в качестве регулируемого источника питания экономически выгодным.

В четвертой главе рассмотрены вопросы применения КП в качестве регулируемого источника питания ЧР АЭП технологических установок с функцией генерации реактивной мощности емкостного характера в питающую сеть.

В соответствии с предложенной в гл. 2 структурной схемой ПЧ на основе КП с АИН или АИТ были предложены варианты силовой схемы КП и определена методика выбора ее элементов, наиболее важной частью которой является выбор конденсаторов УЗП, осуществляющийся в соответствии с индуктивностью фазы источника L , средним током на выходе КП I_d и средним напряжением на конденсаторе U_c . Установлено, что при выборе емкости можно принять максимальное напряжение на конденсаторе равным 300-400 В.

В соответствии с принципом работы КП, рассмотренным в гл. 2 и исследованиями преобразователя методом компьютерного моделирования и лабораторного эксперимента, проведенными в гл. 3, была предложена функциональная схема системы управления КП (СУ КП), рассмотрена ее работа и особенности схемной реализации. Особенностью системы является реализация принципа управления вентилями S7, S8 УЗП (рис. 1) на основе определения напряжения на его конденсаторах в конце первого этапа коммутации, позволяющая с одной стороны обеспечить отработку угла первого этапа коммутации, с другой – защиту конденсаторов от аварийного уровня перенапряжений. Функциональная схема СУ КП показана на рис. 4, 5.

Структурно она представляет собой многоканальную синхронную замкнутую СУ вертикального типа и состоит из следующих основных блоков:

- трансформаторы синхронизации ТСА, ТСВ, ТСС, понижающие напряжение фазы до необходимого уровня с одновременной гальванической изоляцией СУ от сети;
- блок синхронизации БС с питающей сетью, обеспечивающий синхронизацию импульсов управления силовых вентилях КП по времени с фазными напряжениями сети, необходимую для отсчета угла управления;
- формирователь импульсов ФИ, синтезирующий импульсы управления вентилями S1–S6 силового моста КП с заданными значениями фазы (угла управления) и длительности;
- распределитель импульсов РИ, формирующий импульсы управления вентилями S7, S8 УЗП на основе импульсов управления вентилями S1–S6, величин напряжений на конденсаторах и сигнала задания по минимальному напряже-

нию конденсатора в конце первого этапа коммутации;

- блок гальванической развязки БГР, выполняющий защитную функцию, электрически изолируя СУ от силовой части КП;
- блок аварийного останова преобразователя БАО, мгновенно прекращающий подачу импульсов управления на все 8 вентилях КП;
- блок защиты, выполняющий своевременное обнаружение превышения токов на входе и выходе преобразователя и сигналов ошибки от драйверов силовых вентилях КП;
- блок вычисления напряжений задания для ФИ и РИ на основе напряжения задания выходной величине КП (напряжения или тока);
- датчики напряжения на конденсаторах УЗП, трансформаторы тока и датчик тока на выходе КП, измеряющие соответствующие величины;
- блока питания, обеспечивающего питание системы стабилизированными напряжениями.

Описанный состав системы обеспечивает управление КП в случае применения его в составе ПЧ с АИН или АИТ для ЧР АЭП. В случае применения КП в качестве самостоятельного элемента системы электроснабжения данная система должна быть дополнена блоками ввода-вывода параметров и сигналов задания, а также блоками регулирования и ограничения контролируемой выходной величины (напряжения или тока).

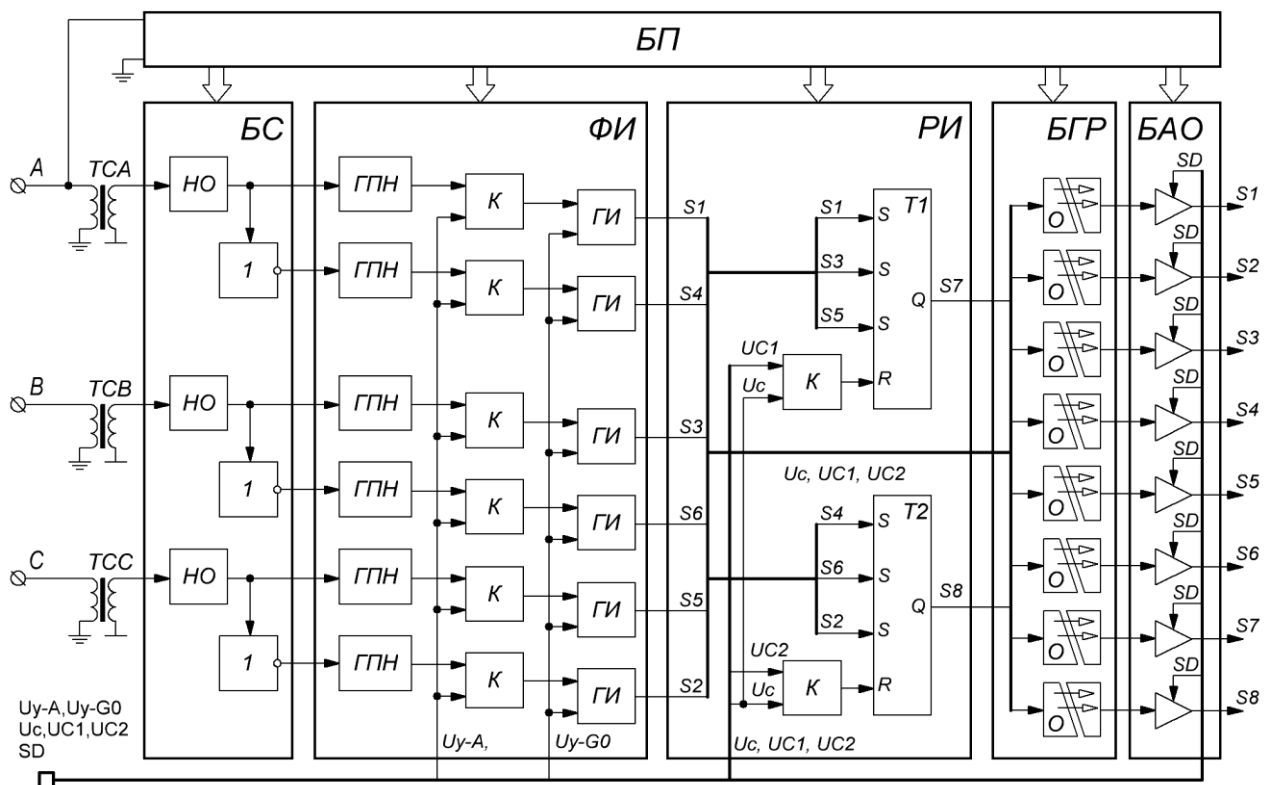


Рис. 4. Функциональная схема СУ КП (первая часть)

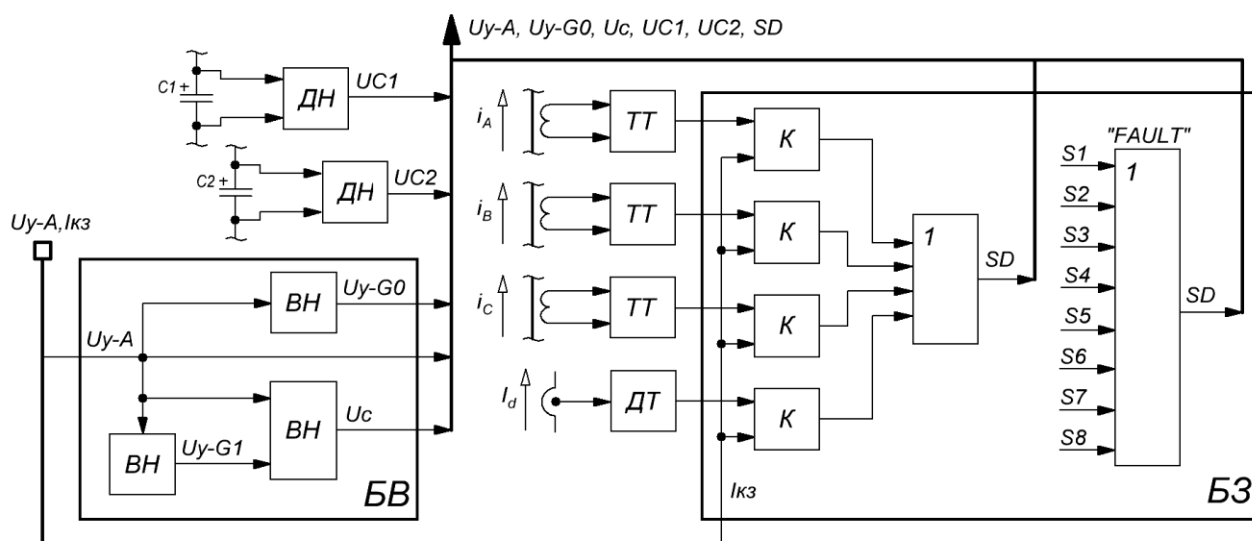


Рис. 5. Функциональная схема СУ КП (вторая часть)

В заключительной части главы рассмотрен вопрос определения экономической эффективности применения КП в ПЧ для ЧР АЭП. В качестве примера был произведен расчет экономического эффекта применения ПЧ на основе КП с АИН в ЧР АЭП турбомеханизмов, как одного из наиболее распространенных видов технологических установок, а именно осевых вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения (АВО). Срок окупаемости КП при рассмотренной мощности двигателя 37 кВт, стоимости 1 кВт·ч электроэнергии 3 руб. и 1 кВт существующего ПЧ 3000 руб. составляет 4 месяца.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано наличие надежных и эффективных устройств компенсации реактивной мощности и регулирования производительности в установках с АЭП является экономически обоснованной необходимостью.

2. Выявлено, что статический полупроводниковый компенсационный преобразователь (КП) обеспечивает снижение потерь активной энергии благодаря совмещению в одном устройстве двух основных функций: регулирование напряжения (тока) для питания электропривода технологической установки и генерация реактивной мощности емкостного характера в питающую сеть.

3. Доказано, что узел защиты от коммутационных перенапряжений (УЗП), работающий в составе КП в его основном режиме с опережающими углами управления, улучшает условия работы силовых ключей КП, снижает коэффициент нелинейных искажений (КНИ, THD) сетевого напряжения и тока, увеличивает жесткость внешних характеристик преобразователя и КПД системы «питающая сеть - КП».

4. Определено, что применение КП в ПЧ для ЧР АЭП турбомеханизмов в качестве регулируемого источника питания АИН или АИТ делает возможным устранение недостатков существующих ПЧ с неуправляемыми выпрямителями и выпрямителями с естественной коммутацией путем разделения функций регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения (тока) и генерируемой в сеть реактивной мощности между КП и инвертором.

5. Разработанная компьютерная модель КП позволила изучить различные режимы его работы и оценить влияние различных параметров на входные и выходные характеристики преобразователя.

6. Лабораторные испытания КП подтвердили его способность выполнять одновременно две функции, что делает применение КП экономически выгодным.

7. Предложены варианты силовой схемы КП и определена методика выбора ее элементов, где наиболее важным стал выбор конденсаторов УЗП. Установлено, что при выборе емкости можно принять максимальное напряжение на конденсаторе равным 300-400 В.

8. Предложена функциональная схема системы управления КП (СУ КП), особенностью которой является реализация принципа управления вентилями 7,8 УЗП, позволяющая обеспечить отработку угла первого этапа коммутации и защиту конденсаторов от аварийного уровня перенапряжений.

9. Расчет экономической эффективности применения ПЧ на основе КП с АИН в ЧР АЭП турбомеханизмов показал, что срок окупаемости КП составляет менее года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Зайцев А. И. Применение компенсационных выпрямителей в асинхронных частотно-регулируемых электроприводах турбомеханизмов в целях энергосбережения. / А. И. Зайцев, К. А. Разинкин, А. С. Кожин // «Вестник Воронежского государственного технического университета». – Воронеж: Издательство ВГТУ, 2012, Т.8, №3, с. 162-165.

2. Кожин А.С. Преобразователь с функцией компенсации реактивной мощности для регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока / А. С. Кожин // «Электротехнические комплексы и системы управления», Воронеж.- ВГТУ, №2/2013, с. 72–77.

3. Кожин А.С. Анализ влияния узла защиты от коммутационных перенапряжений на характеристики компенсационного преобразователя при опережающих углах управления / А. С. Кожин // «Электротехнические комплексы и системы управления», Воронеж. - ВГТУ, №3/2013, с.

Работы, опубликованные в других изданиях

4. Кожин А.С. Компенсационные выпрямители в асинхронных электроприводах / А. С. Кожин // Научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 16-17 апреля 2012 года. Сборник докладов.– Воронеж: Воронежский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго РФ, 2012., с. 124–126.

5. Кожин А. С. Моделирование систем автоматического управления с использованием САПР / А. С. Кожин, Е. О. Головинов, А. И. Зайцев // Проблемные вопросы и организация научно-исследовательской деятельности студентов: материалы II межвузовской научно-практической конференции / ВИВТ АНОО ВПО, РосНОУ ВФ, - Воронеж: Воронежский институт высоких технологий, 2010. – 115 с.

6. Кожин А. С. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод аппаратов воздушного охлаждения природного газа / А. С. Кожин // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: труды Всерос. студенческой научн. техн. конф. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. 263 с.

7. Кожин А. С. Моделирование управляемых выпрямителей с искусственной коммутацией силовых вентилях / А. С. Кожин, Е. О. Головинов, А. И. Зайцев // Проблемные вопросы и организация научно-исследовательской деятельности студентов: материалы II межвузовской научно-практической конференции / ВИВТ АНОО ВПО, РосНОУ ВФ, - Воронеж: Воронежский институт высоких технологий, 2010. –115 с.

8. Кожин А. С. Управляемый выпрямитель с искусственной коммутацией силовых вентилях и вопросы энергосбережения в электроприводах / А. С. Кожин, А. И. Зайцев // Информационные технологии в связи, вычислительной техники и энергетики: сборник трудов международной научной конференции. В 3 ч. Ч.3 / отв. ред. д. т. н., проф. Шиянов А.И. – Воронеж: Международный институт компьютерных технологий, 2010. -134с.

9. Кожин А. С. Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентиляторов для регулирования теплопроизводительности аппаратов воздушного охлаждения природного газа / А. С. Кожин, А. И. Зайцев // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов III-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 29 января 2011 г.). В 2-х ч. Ч. II. / Под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – 172 с.

10. Кожин А. С. Применение управляемых выпрямителей с искусственной коммутацией в регулируемых электроприводах/ А. С. Кожин, А. И. Зайцев // Современная российская наука глазами молодых исследователей: Материалы Всероссийской научно-практической конференции-форума молодых ученых и

специалистов (февраль, 2011 г.). - Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. – 282 с.

11. Кожин А. С. Анализ электромагнитной совместимости системы «питающая сеть - преобразователь частоты - асинхронный двигатель» при импульсной модуляции / А. С. Кожин, А. И. Зайцев // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ - 2011»: Матеріали 7-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., Севастополь 11 — 15 квітня 2011 р. / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. Ю.Б. Гімплевич. — Севастополь: СевНТУ, 2011. — 479 арк.

12. Кожин А. С. Энергосберегающий асинхронный электропривод / А. С. Кожин, А. И. Зайцев // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Всероссийской конференции Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. 300с.

13. Кожин А. С. Применение компенсационных преобразователей в целях энергосбережения при добыче и переработке природного газа / А. С. Кожин // «ДАО Газпроектинжиниринг»: проблемы и перспективы развития: Сб. науч. тр. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2012. – с. 66-68.

14. Кожин А. С. Система управления компенсационным выпрямителем для применения в асинхронных частотно-регулируемых электроприводах/ А. С. Кожин, Е. О. Головинов, А. И. Зайцев // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VI-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 28 января 2012 г.) / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – с. 82-85.

Подписано в печать ..20.
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл.печ. л. 1,0. Тираж 85 экз. Заказ № _____

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева 603000, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24