

На правах рукописи

БЕКМАЧЕВ Александр Егорович

Повышение эффективности средств плавной коммутации электроустановок в условиях критических нагрузок на предприятиях АПК

Специальность:

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск 2010

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Ижевская ГСХА»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кондратьева Надежда Петровна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Андрианова Людмила Прокопьевна
(ФГОУ ВПО «Башкирский ГАУ», г.Уфа)

доктор технических наук, профессор
Башилов Алексей Михайлович
(ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П.Горячкина», г. Москва)

Ведущая организация: ГНУ ВИЭСХ, г. Москва

Защита состоится 21 мая 2010 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета КМ 220.030.02 при ФГОУ ВПО «Ижевская ГСХА» (ИжГСХА) по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11, аудитория 2.

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью, просим выслать по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО ИжГСХА.
С авторефератом можно ознакомиться на официальном сайте: www.izhgsha.ru

Автореферат разослан 20 апреля 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Н.Ю. Литвинюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное предприятие агропромышленного комплекса (АПК) характеризуется все более широким внедрением промышленных методов хозяйственной деятельности. Увеличение степени автоматизации производства и переработки сельхозпродукции и широкое применение многочисленного электрического оборудования в быту и подсобных хозяйствах определяют и высокие современные темпы роста энергопотребления.

Наряду с этим, на предприятиях АПК возникают проблемы, связанные со слабым развитием инфраструктуры местных распределительных сетей сельскохозяйственных потребителей (СМЭС) – недостаточная мощность источников электроэнергии, значительные потери из-за высокой протяженности линий электропередач от распределительных подстанций до потребителей, неравномерность распределения нагрузки по фазам. Отчасти такая ситуация связана со взрывным характером роста энергооборуженности АПК в последние годы, что сложно было спрогнозировать в период проектирования и строительства СМЭС в предыдущие десятилетия. В дальнейшем для нагрузки, мощность которой соизмерима с мощностью источника, введено понятие «критической нагрузки» (КН). Следствием КН является низкое качество электроэнергии на стороне потребителя: высокочастотные шумы, провалы и выбросы напряжения, выходящие за пределы, допустимые ГОСТ 13109-97.

Следствием низкого качества электроэнергии являются как прямые убытки из-за нарушений технологических процессов, вызывающих снижение выхода годной продукции, из-за простоев, внеплановых ремонтов так и убытки от дополнительных капитальных затрат на замещение преждевременного выводимого из эксплуатации электрооборудования (ЭО).

Учеными в области применения электротехнологий в сельскохозяйственном производстве и управления качеством электроэнергии в распределительных сетях: Л.Г.Прищепом, И.Ф.Бородиным, Д.С.Стребковым, А.М.Башиловым, Ю.М.Жилинским, Л.П.Шичковым, В.С.Литвиновым, В.А.Козинским, А.К.Лямцовым, А.И.Учеваткиным, Л.П.Андриановой, Н.П.Кондратьевой, А.С.Степановым и другими разработаны теоретические основы эффективного использования электрической энергии и указаны экономичные способы повышения её качества.

В частности, наряду с применением пассивных корректирующих устройств на стороне трансформаторных подстанций признано эффективным использование средств плавной коммутации в составе электроустановок, что обеспечивает инвариантность рабочих режимов аппаратуры потребителя к неблагоприятным факторам МЭС и позволяет увеличить срок эксплуатации ЭО.

В связи с тем, что механические и реакторные устройства ограничения пусковых токов морально устарели и экономически неэффективны, а новый класс полупроводниковых ключей – IGBT-транзисторы - еще достаточно дорог, сохраняется интерес к схемотехническим решениям с использованием детально проработанных тиристорных устройств плавного пуска на классическом законе фазового управления и его модификациях, таким, например, как распространенный в промышленности тиристорный регулятор напряжения с синхронно-фазовым управлением.

Вместе с этим, анализ специальной литературы показал, что формирование новых функций регулирования, создание аппаратных средств контроля и диагностики параметров местной электрической сети (МЭС) позволяют создать конкуренцию новой схемотехнике при сравнимых технико-экономических характеристиках, что весьма ценно.

Таким образом, предлагаемое в работе техническое решение проблемы «последней мили», то есть улучшение качества электроэнергии в СМЭС на стороне 0,4 кВ и повышение технологических и экономических показателей работы различных электроустановок в условиях критической нагрузки, является актуальным. Не вызывает сомнений и актуальность разработки методов определения расчетных нагрузок на базе имитационного и математического моделирования, а также критериев диагностики и тестирования на наличие КН в той или иной МЭС.

Исследования и разработки выполнялись автором в соответствии с комплексными темами НИС ФГОУ ВПО «Ижевская ГСХА» (2000...2010гг.) в рамках государственной программы 0.51.21, задание 02 – «Разработать и внедрить новые методы и автоматизированные технические средства применения электрической энергии в технологических процессах сельскохозяйственного производства».

Цель работы состоит в научном обосновании и разработке средств плавной коммутации нагрузки потребителей на предприятиях АПК, обеспечивающих требуемые показатели качества электрической энергии в местных распределительных сетях сельскохозяйственных потребителей и позволяющих повысить надежность, экономичность и увеличить срок эксплуатации электроустановок.

Для достижения поставленной цели **решались следующие задачи:**

- оценка различных способов плавной коммутации нагрузки в сетях переменного тока на основе анализа зарубежной и отечественной специальной литературы и исследование причин появления КН в МЭС/СМЭС;

- исследование свойств и характеристик МЭС на стороне низкого напряжения и специфики их воздействия на приемники электрической энергии, анализ значимых показателей качества электроэнергии для прикладных работ по диагностике и тестированию МЭС на наличие КН;

- разработка математической модели изменения нагрузки МЭС/СМЭС во времени, изучение модели, ее адекватности с учетом экспериментальных данных, разработка комплексного показателя качества МЭС/СМЭС и анализ эффективности фазового способа управления активной и активно-индуктивной нагрузкой в сетях переменного тока промышленной частоты применительно к тиристорам, разработка на его базе новой функции регулирования;

- аппаратная реализация нового класса коммутационных устройств на базе анализа экспериментальных и расчетно-математических данных с определением характеристик изделий в лабораторных условиях и в инфраструктуре аппаратуры реальных СМЭС;

- разработка технических требований на устройства плавного пуска, для преимущественного применения на объектах АПК и выработка рекомендаций и инструкций, обеспечивающих эффективное применение устройств плавной коммутации на производственных и бытовых объектах в СМЭС, подверженных КН.

Объектом исследования является система плавной коммутации электрооборудования и СМЭС, снабжающие эти потребители электрической энергией.

Предметом исследования является установление закономерностей изменения качественных показателей работы электроустановок по математическим, компьютерным и натурным моделям.

Методы исследования. В работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования.

Теоретические исследования основаны на использовании методов вычислительной и прикладной математики, положений математической статистики и теории выбросов случайных процессов.

В экспериментальных исследованиях разработанных моделей и алгоритмов использовано математическое и имитационное моделирование электронных схем с использованием программных пакетов Electronic Workbench v.5.0, Accel 2000, проведен анализ накопленных статистических данных с помощью табличного редактора MS Excel 2000 и программного пакета Matlab.

Достоверность и обоснованность подтверждается результатами практического применения разработанных методов, алгоритмов, программных средств и образцов устройств плавного пуска, научными трудами и апробацией созданного научно-технического продукта на представительных научных форумах. Полученные в работе результаты и выводы подтверждаются при их сравнительном анализе с известными результатами современных исследований и разработок.

Теоретические положения работы, обосновываются адекватным выбором исходных посылок и последовательным применением математического аппарата при получении из них выводов, а также верификацией этих выводов данными систематического исследования полученных аналитических результатов.

Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими выводами, достоверность обеспечена использованием аттестованных контрольно-диагностических средств, большим объемом экспериментального материала, статистическими методами обработки данных и воспроизводимостью результатов, апробацией основных материалов исследования в лабораторной и производственной практике.

На защиту выносятся следующие положения:

- способ автоматического изменения фазового угла в тиристорном регуляторе на базе синтезированной функции регулирования и аппаратная реализация тиристорного устройства плавного пуска;
- результаты исследования динамических показателей СМЭС стандартными средствами измерений;
- зависимость качества СМЭС от наличия или отсутствия устройств коррекции;
- результаты лабораторных исследований и производственной эксплуатации с технико-экономической оценкой эффективности предлагаемых технических решений.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- **теоретически и экспериментально** установлена целесообразность совершенствования устройств плавной коммутации электрооборудования в СМЭС, подверженных воздействию критической нагрузки, при котором обеспечивается получение как минимум паспортных характеристик электроустановок и даже увеличение срока их эксплуатации;
- **предложена и исследована методика** и опытная установка ускоренных ресурсных испытаний в режиме частых включений на примере облучательных / обогревательных ламп для сравнительного определения срока службы ЭО, позволяющая оценить эффективность устройства плавной коммутации, долговечность и безотказность электроустановок;
- **получена математическая модель** определения закономерностей изменения нагрузки СМЭС во времени на основе теории выбросов случайного процесса;
- **введено понятие** критической нагрузки в сети, разработан интегральный критерий качества СМЭС в условиях КН;
- полученная математическая модель совместно с **комплексным критерием** качества СМЭС является основой методики создания надежного и экономичного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

Практическая ценность работы:

- **разработана** оригинальная схемотехническая реализация устройства плавного подключения мощной электрической нагрузки, не требующая модификации существующей ПЗА;
- **разработаны** технические требования и в условиях реальной хозяйственной деятельности **опробовано** устройство плавного включения нагрузки для сетей переменного тока промышленной частоты, позволяющее ограничить пусковые токи;
- **доказана** возможность и определены пути улучшения качества СМЭС, повышения безопасности и комфортности работы персонала на электроустановках, содержащих движущиеся рабочие органы, повышения ресурса электроустановок, чувствительных к перегрузкам;
- **проведены** теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие на базе построенных математических моделей и полученных экспериментальных данных описать и спрогнозировать поведение потребителя электрической энергии в реальных СМЭС в условиях КН.

Реализация результатов исследования.

- разработанное тиристорное устройство автоматического плавного включения электрической нагрузки применено в системах освещения, электропитания и вентиляции в ФГУП «УОР-808 УССТ-6», г.Ижевск; ГУП «Птицефабрика «Вараксино», г. Ижевск; СПК «Туклинский» Увинского р-на Удмуртской Республики; ООО «Регион», г. Ижевск, о чем получены соответствующие отзывы и акты внедрения;
- способ реализации плавного пуска и устройство для его реализации защищены патентом РФ;
- разработанный комплексный критерий качества МЭС был использован как элемент предварительного анализа объекта при разработке систем защиты информации;
- разработанное оборудование успешно прошло производственную проверку в течение 2 лет на предприятиях Удмуртской Республики;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе при выполнении курсового и дипломного проектирования и в научных работах ФГОУ ВПО «Ижевская ГСХА» и ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет» (ИжГТУ).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях ТУСУР г. Томск (2008-2009 гг.); XX международной научно-практической и III научно-технической конференциях ИжГТУ (2005-2006 гг.); XVIII, XIX, XX, XXI научно-практических конференциях ИжГСХА (1998-2001 гг.); научно-практических конференциях РГАЗУ-ВСХИЗО, г. Балашиха (1998-2000 гг.).

Публикации. Основные результаты научной работы отражены в 19 печатных работах, в том числе:

- в изданиях, рекомендованных ВАК, опубликовано 7 статей, включая 2 патента РФ на полезную модель;
- в сборниках научных трудов, материалах научных конференций – 12 статей.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 4 главы и заключение, изложенные на 127 с. текста, а также 7 приложений. В работу включены 37 рис., 4 табл. Список использованной литературы включает 140 наименований, из которых 9 на иностранном языке. В приложениях представлены акты об использовании результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, определены объект, предмет исследований и дано краткое изложение основных понятий и положений, выносимых на защиту.

В первой главе «Анализ способов плавной коммутации нагрузки. Анализ причин появления критической нагрузки в сетях, ее влияние на показатели качества электроэнергии» дан обзор этапов и основных моментов рассматриваемой задачи, проведен патентно-информационный поиск. Доказана перспективность научных исследований и опытно-конструкторских работ по разработке электронного блока плавного включения для применения в составе стандартной пускозащитной аппаратуры (ПЗА).

Дан анализ и классификация электроустановок по условиям пуска. Показано, что для большинства электроустановок в сетях с КН условия пуска являются тяжелыми.

Установлено, что эффективным средством энерго- и ресурсосбережения в МЭС/СМЭС с КН является плавная коммутация нагрузки. Ее суть состоит в постепенном изменении действующего значения напряжения, подводимого к нагрузке, от нулевого до номинального. При работе с активной или активно-индуктивной нагрузкой действующее значение напряжения может быть изменено двумя способами: изменением амплитуды напряжения при сохранении синусоидальности и «отсечением» части площади синусоиды при сохранении исходной амплитуды. Изначально применялись, в

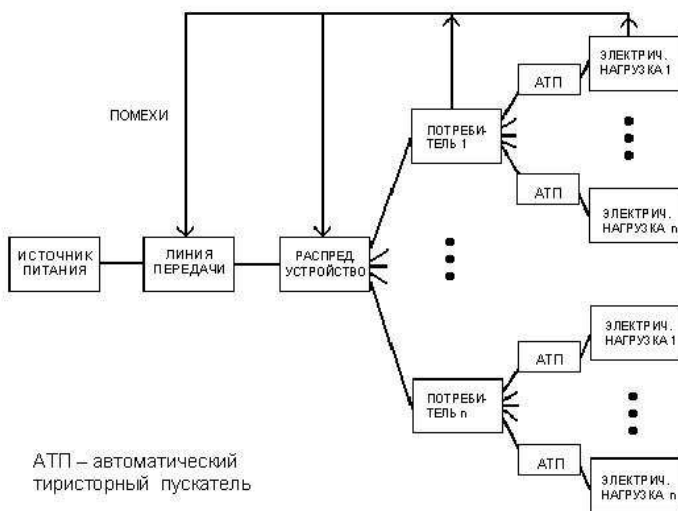


Рисунок 1 - Структура МЭС/СМЭС с КН

основном, три метода плавного подключения нагрузки, два из которых реализуют изменение амплитуды питающего синусоидального напряжения.

Первый способ – трансформаторный, заключается в изменении числа витков цепи вторичной обмотки трансформатора. При явной простоте, способ характеризуется дороговизной и громоздкостью аппаратной части, пропорциональными мощности устройств, большими тепловыми и индукционными потерями. Глубокое регулирование, то есть большой диапазон изменения мощности вторичной цепи трудно достижимы. Второй способ – потенциометрический. Это простое техническое решение, однако, величина непроизводительных энергозатрат велика.

Еще одним классом устройств плавной коммутации являются различные варианты механических центробежных муфт. Эти устройства позволяют бесступенчато изменять долю мощности, передаваемой с вала электродвигателя на вал ведомого механизма. Недостатки таких регуляторов мощности – наличие значительных вращающихся масс, отбирающих мощность от системы, большой объем регламентных работ по обслуживанию муфт.

Широкие возможности по плавной коммутации и управлению мощностью нагрузки предоставляет схемотехника на базе тириستоров и симисторов.

При этом базовым способом является фазовое управление, когда вентильные элементы включаются и выключаются синхронно с переменным напряжением ис-

точника питания и подключают последний к нагрузке на определенную регулируемую часть каждого периода. Этот способ позволяет эффективно и экономно регулировать среднее значение мощности, подводимой к нагрузке. Регулировка осуществляется путем изменения фазового угла, при котором происходит отпирание тиристора, когда последний проводит ток только в течение оставшейся части соответствующего полупериода. В главе систематизированы схемотехнические варианты реализации фазового метода управления нагрузкой на основе тиристоров.

Дано сравнение схем плавной коммутации и регулировки мощности электрической нагрузки на тиристорах и новом классе полупроводниковых ключей – IGBT-транзисторах. Показано, что схемотехника IGBT-транзисторов позволяет легко создавать одно- и трехфазные управляемые инверторы напряжения с ШИМ-управлением. Однако для их полноценного использования требуется микроконтроллерное управление с развитой системой обратных связей, а также звено постоянного тока на мощных диодах, что удорожает устройство в целом. Несмотря на лучшие параметры переключения (повышенная частота, устойчивость к dU/dt) по сравнению с тиристорами, IGBT уступают последним по устойчивости к импульсным токовым перегрузкам.

Для сравнения можно привести области практического применения технических средств реализации плавного включения нагрузки - полупроводниковых ключей при использовании их в составе регуляторов мощности, рис. 2.

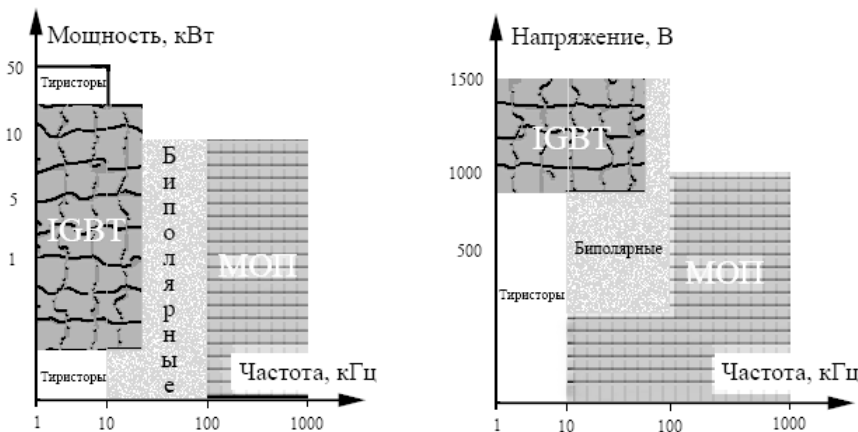


Рисунок 2 - Рабочие области полупроводниковых вентиляционных элементов

электрического обогрева, двигателей электроприводов стационарных механизмов и ручного электроинструмента, бытовой электрической техники и электрических средств малой механизации и автоматизации.

Однако требуется такое техническое решение фазового регулятора, которое бы позволяло обеспечивать автоматическую или управляемую коммутацию нагрузки. При этом важно обеспечить низкую начальную и эксплуатационную стоимость такого устройства при высокой надежности и ремонтпригодности. В главе эти положения решены как прикладная задача.

С этой целью произведен обзор теоретического материала для обеспечения решения поставленной задачи и рассмотрены наиболее эффективные способы реализации среди существующих на рынке устройств. Вопросы управления тиристорами глубоко проанализированы в работах д.т.н., проф. Л.П.Шичкова, в частности, применительно к преобразовательной технике электроустановок в АПК.

Большую практическую ценность представляет техническое решение, защищенное патентом РФ № 2066915 «Устройство регулирования мощности». Оно ис-

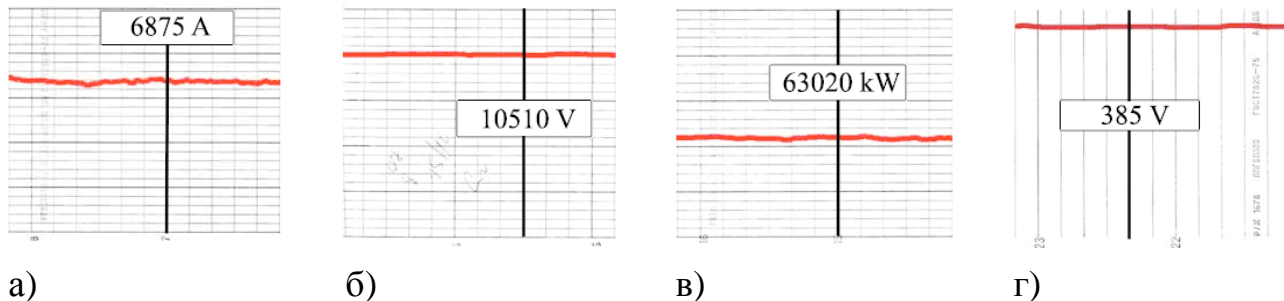
Таким образом, в главе показано, что в перспективе целесообразно использовать тиристоры в качестве ключевых элементов в регуляторах малой, средней и большой мощности для сетей переменного тока. Точность фазовых регуляторов – 5...8% - достаточна для большинства задач: коммутации систем освещения, коммутации в системах автоматики и телеме-

пользовано в серийно выпускаемой предприятием «НТЦ «СИТ», г.Брянск, интегральной микросхеме (ИМС) КР1182ПМ1. При очевидных достоинствах ИМС КР1182ПМ1 существует ряд эксплуатационных ограничений, на которые указывает сам производитель. Недостаток ИМС КР1182ПМ1 состоит в том, что не реализован режим автоматического плавного пуска при подаче сетевого напряжения. Кроме того, трудно реализуем режим повторного плавного пуска. Это вызывает токовую перегрузку микросхемы и может привести к выходу её из строя.

Таким образом, требуется экономичное и технически эффективное решение автоматического плавного включения при подаче сетевого напряжения и обеспечивающее надежную работу устройства в режиме частых включений.

Во второй главе «Исследование динамики изменения основных показателей качества электроэнергии в сельских местных электрических сетях, подверженных влиянию критической нагрузки» оценено влияние показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на общую электромагнитную совместимость объектов, где наиболее явно проявляется наличие КН и ее влияние очень ощутимо: зерносушильный комплекс, комбикормовый цех, цех первичной переработки, гараж (машинно-тракторная станция), садоводческое товарищество; выделены наиболее значимые из ПКЭ. Типичным примером обособленного объекта служит птицефабрика полного цикла, расположенная в загородной зоне. Показано, что электроприемники на подобных объектах, особенно чувствительны к отступлению показателей качества электроэнергии от нормально допустимых.

В главе проведено исследование основных показателей качества электроэнергии обособленных объектов. На первом этапе задокументированы ПКЭ на оборудовании ТЭЦ-2 г.Ижевска: ток ротора ТГ№2, напряжение статора ТГ№2, выходная мощность (статора) ТГ№1. Результаты измерений даны на рис. 3. Анализ показыва-



а) б) в) г)
Рисунок 3 - Контрольные измерения на ТЭЦ-2 г.Ижевска и ТСН ПС «Ува»: а)-ток ротора ТГ№2, б)-напряжение на статоре ТГ№2, в)-выходная мощность (статора) ТГ№1, г)-напряжение на ТСН.

ет, что контролируемые параметры находятся в нормально допустимых пределах, что говорит о стабильности сети на стороне высокого напряжения. На втором этапе исследовано качество СМЭС при различных способах коммутации нагрузки. Замеры были проведены на КТП 250-10/0,4 в РЭС «Ува» (пос. Ува, УР) на стороне 0,4 кВ. В качестве регистратора использовался прибор НЗ93. В этом случае исследовался основной показатель качества электроэнергии – отклонение напряжения от номинального значения. Показания прибора приведены на рис. 4. Аналогичные замеры отклонения напряжения от номинального значения были произведены с использованием компьютерного устройства сбора и анализа информации об основных ПКЭ «Прорыв-КЭ», рис. 5, 6. Таким образом, было получено документальное подтверждение наличия КН в СМЭС. Выделены основные базовые и производные ПКЭ, наиболее значимые для практического применения: среднее за период измерений

значение напряжения $U_{ср.}$, установившееся отклонение напряжения δU_y , размах изменения напряжения δU_t .

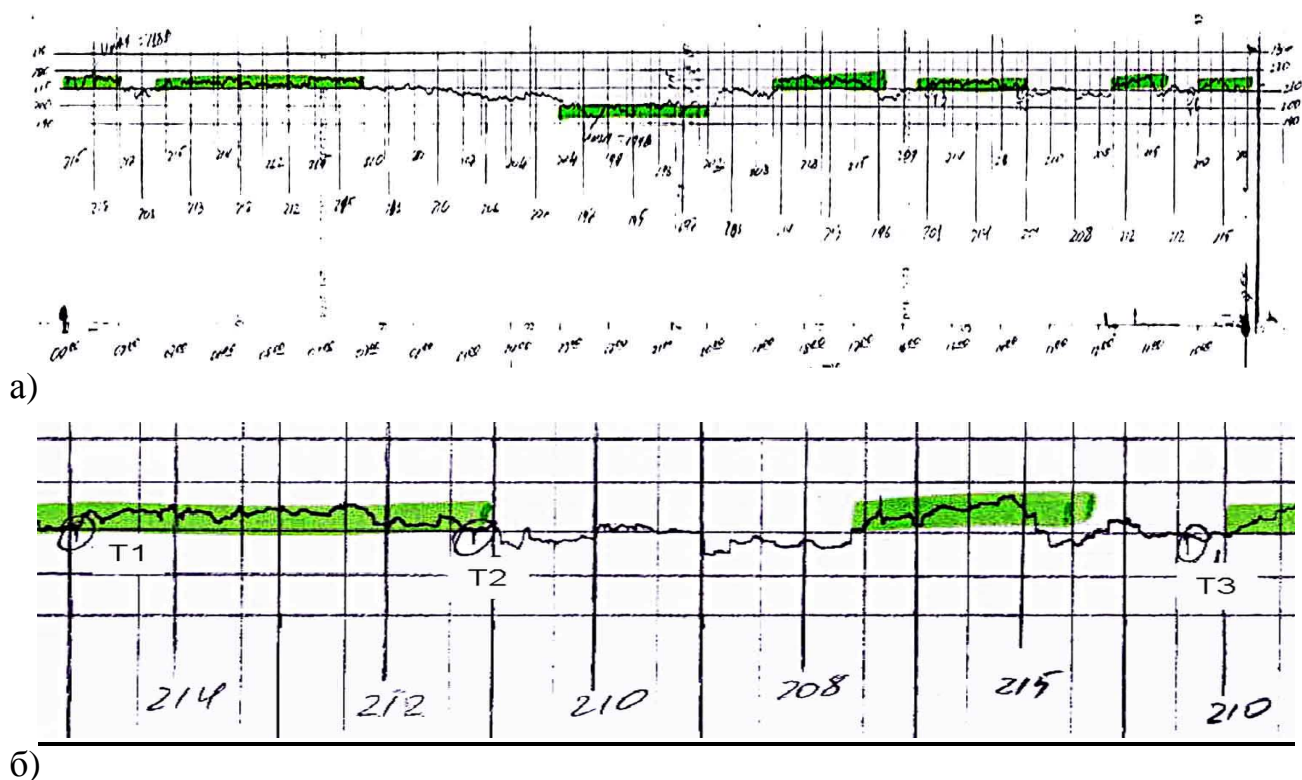


Рисунок 4 - Расшифровка суточных показаний прибора N393 на ПС «Ува»: а) – суточная развертка и б) - фрагмент



Рисунок 5 - Копия экрана анализа данных прибора «Прорыв-КЭ». Значение установившегося отклонения напряжения превышено в 3 раза

Для получения численного критерия КН введен интегральный показатель на основе полученных экспериментальных данных: t_{Umin} , с – суммарная длительность работы МЭС/СМЭС на пониженном напряжении (ниже минимально допустимого и предельного допустимого) за период наблюдений, $t_{Umin} = f(\sum_{24} \Delta t_n, \delta U_y, \delta U_t, U_{ср.})$.

Наиболее доступным способом расчета t_{Umin} является вычисление U_{min} на интервале 24 часа. За нормально допустимое значение t_{Umin} на базе нормативов ГОСТ 13109-97 принят показатель 720 с. Для получения наиболее достоверных данных следует получить среднее значение для рабочих и выходных дней в летний и

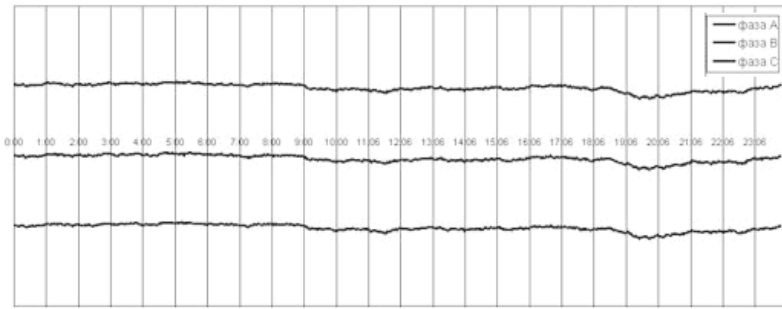


Рисунок 6 - Суточная развертка значения напряжения по 3 фазам, полученная прибором «Прорыв-КЭ». Видны периоды пиковых нагрузок

ной мерой предотвращения КН признано внедрение устройств плавного пуска, выработаны предложения по созданию лабораторной, а затем - и опытно-промышленной установки для апробации предложенных технических решений и разработаны соответствующие методики.

В третьей главе «Математическая модель изменения нагрузки в МЭС с КН и выбор оптимальной функции регулирования плавного пуска» установлено, что

задача построения графика активной электрической нагрузки в МЭС с КН сводится к определению среднего числа выбросов траектории стационарного дифференцируемого случайного процесса над заданным уровнем, которое, в свою очередь имеет нормальное распределение вероятности.

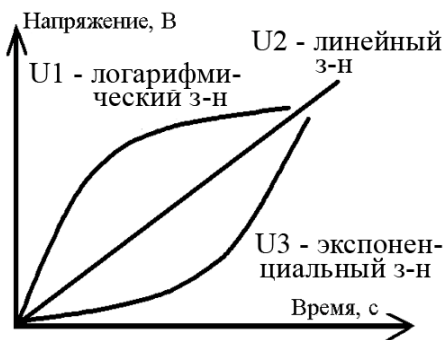


Рисунок 7 - Варианты реализации функций регулирования

задача построения графика активной электрической нагрузки в МЭС с КН сводится к определению среднего числа выбросов траектории стационарного дифференцируемого случайного процесса над заданным уровнем, которое, в свою очередь имеет нормальное распределение вероятности. На основе этой закономерности дано обоснование оптимальной функции регулирования при пуске электроустановки и показано, что управление коммутацией нагрузки наиболее целесообразно проводить по экспоненциальному закону, как учитывающему в полной мере физические свойства объекта управления, рис. 7. Дано математическое описание закономерностей изменения нагрузки в МЭС/СМЭС переменного тока применительно к длительности провалов напряжения. Произведен структурный синтез системы автоматического управления (САУ) с учетом физических характеристик объекта управления, рис. 8. Простейшая САУ для решения этой прикладной задачи представляет собой однокаскадное устройство с одной петлей обратной связи.

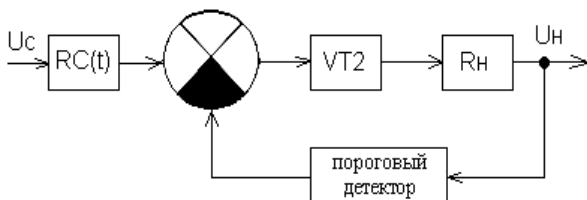


Рисунок 8 - Структурная модель системы автоматического управления (САУ)

стью $t_0 = t_u - t_6$ по числу выбросов траектории случайного процесса. Исходя из того, что основным показателем, указывающим на наличие КН, является продолжительность работы МЭС при пониженном напряжении, примем критерий длительности нахождения наблюдаемой величины над/под критическим уровнем за базовый. Та-

зимний сезоны. В результате проведенного автором мониторинга реальных МЭС, полученные значения t_{Umin} варьируются от 1800 с до 30600 с, что означает длительность их работы в условиях КН от 0,5 до 8,5 часа в течение суток.

На основе проведенных исследований самой действенной

ким образом, нам необходимо решить задачу **определения среднего числа выбросов траектории стационарного дифференцируемого случайного процесса над заданным уровнем.**

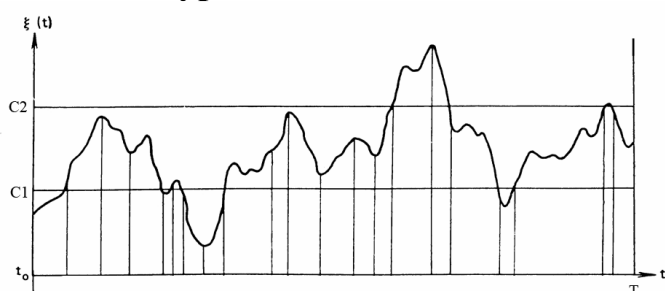


Рисунок 9 - Типичная траектория стационарного дифференцируемого случайного процесса. c_1, c_2 – базовые уровни, T - период

Решение разнообразных задач электротехники и электроэнергетики требует необходимости исследования статистических свойств. При этом известно, что среднее число положительных выбросов $N_{\xi}^{+}(c, I)$ траектории стационарного дифференцируемого случайного процесса $\xi(t)$ над заданным уровнем c периодом $T=I$ определяется формулой Райса:

$$N_{\xi}^{+}(c, I) = \int_0^{\infty} \dot{\xi} W_2(\xi, \dot{\xi}) \Big|_{\xi=c} d\xi, \quad (1)$$

в которой $W_2(\xi, \dot{\xi}) \equiv W_2[\xi(t), \dot{\xi}(t)]$ - совместная плотность вероятности для значений $\xi(t)$ и $\dot{\xi}(t) = d\xi(t)/dt$ в совпадающие моменты времени t . Для негауссовых процессов $\xi(t)$ функция $W_2(\xi, \dot{\xi})$ не всегда поддается простому определению, что усложняет вычисление интеграла (1).

Вместе с тем, при определенных предположениях относительно структуры процессов $\xi(t)$, запись конечных выражений для $N_{\xi}^{+}(c, I)$ формально может осуществляться по одномерной плотности вероятности $W(\xi)$ и корреляционной функции $k_{\xi}(\tau)$ исследуемого процесса. Определим значение интеграла (1) для стационарных случайных процессов.

Рассмотрим произвольный стационарный дифференцируемый случайный процесс $\xi(t)$. Из свойства стационарности следует, что, независимо от вида его двумерной плотности вероятности $W_2(\xi_1, \xi_2)$, совместная плотность вероятности $W_2(\xi, \dot{\xi})$ будет всегда обладать некоррелированными (т. е. линейно-независимыми) переменными $\xi(t)$ и $\dot{\xi}(t)$. Это позволяет условно разделить все многообразие стационарных процессов на процессы, обладающие статистически независимой производной (в совпадающие моменты времени), и процессы, у которых значения $\xi(t)$ и $\dot{\xi}(t)$ связаны между собой нелинейной функциональной зависимостью.

Если процесс $\xi(t)$ обладает статистически независимой производной

$$W_2(\xi, \dot{\xi}) = W(\xi)w(\dot{\xi}), \quad (2)$$

то формула (1) сразу же может быть переписана в виде

$$N_{\xi}^{+}(c, I) = W(\xi) \Big|_{\xi=c} \int_0^{\infty} \dot{\xi} w(\dot{\xi}) d\dot{\xi} = a(\dot{\xi}) W(\xi) \Big|_{\xi=c}. \quad (3)$$

Значение интеграла $a(\dot{\xi})$ является здесь числовой характеристикой одномерной плотности вероятности $w(\dot{\xi})$ производной $\dot{\xi}(t)$. Из свойств производной $\dot{\xi}(t)$ стационарного процесса $\xi(t)$ известно, что функция $w(\dot{\xi})$ характеризуется нулевым средним $\langle \dot{\xi}(t) \rangle = 0$ и является симметричной $w(\dot{\xi}) = w(-\dot{\xi})$.

Кроме того, для многих процессов $\xi(t)$, обладающих свойством (2), функция $w(\dot{\xi})$ является гауссовой:

$$w(\dot{\xi}) = (2\pi\sigma_{\dot{\xi}}^2)^{-1/2} \exp(-\dot{\xi}^2 / 2\sigma_{\dot{\xi}}^2), \quad (4)$$

где $\sigma_{\dot{\xi}}^2 = \langle \dot{\xi}^2(t) \rangle = -\left. \frac{d^2 k_{\dot{\xi}}(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0}$ - дисперсия производной. Это справедливо, в частности, для гауссова процесса, модуля гауссова процесса и их линейных преобразований. В некоторых случаях у негауссовых процессов $\xi(t)$, имеющих даже негауссово многомерное распределение производной $\dot{\xi}(t)$, одномерная плотность вероятности $w(\dot{\xi})$ все же является гауссовой функцией.

Подставив (4) в (3) и выполнив простое интегрирование, получим

$$N_{\dot{\xi}}^+(c, I) = (2\pi)^{-1/2} \sigma_{\dot{\xi}} W(\dot{\xi})|_{\dot{\xi}=c}. \quad (5)$$

Стационарные процессы, обладающие свойствами (2) и (4) назовем процессами первого класса. Следовательно, если $\dot{\xi}(t)$ относится к процессам первого класса, то число выбросов $N_{\dot{\xi}}^+(c, I)$ траектории такого процесса полностью определяется выражением одномерной плотности вероятности $W(\dot{\xi})|_{\dot{\xi}=c}$ и значением $\sigma_{\dot{\xi}} = \left(-\left. \frac{d^2 k_{\dot{\xi}}(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} \right)^{1/2}$. После выражения $\sigma_{\dot{\xi}}$ через спектральные характеристики, формула (5) примет физически более наглядный вид:

$$N_{\dot{\xi}}^+(c, I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (\mu_1\{G_{\dot{\xi}}\} + M_2\{G_{\dot{\xi}}\})^{1/2} W(\dot{\xi})|_{\dot{\xi}=c}. \quad (6)$$

Спектральные моменты $\mu_1\{G_{\dot{\xi}}\}$ и $M_2\{G_{\dot{\xi}}\}$ показывают здесь влияние, соответственно, средней частоты среднеквадратичной ширины спектра исследуемого процесса $\dot{\xi}(t)$ на число выбросов, а значение функции $W(\dot{\xi})|_{\dot{\xi}=c}$ в формулах (5) и (6) играют роль весового множителя, характеризующего относительное время пребывания траектории $\dot{\xi}(t)$ вблизи уровня $\dot{\xi}(t) = c$. Формула (6) позволяет, кроме того, учитывать свойства широкополосности и узкополосности процессов $\dot{\xi}(t)$ и в нужных случаях получать соответствующие приближения.

Проведем теперь сравнение полученной формулы (5) с известной формулой для среднего числа выбросов случайного процесса $\dot{\xi}(t)$, распределение которого представлено рядом Эджворта:

$$N_x^+(c, I) = \frac{\sigma_{\dot{\xi}}}{2\pi} \exp(-\frac{c^2}{2}) \left\{ 1 + \frac{1}{3!} [d_{30}c(c^2 - 3) + 3\sqrt{\frac{\pi}{2}} d_{21}(c^2 - 1) + 3d_{12}c] \right\}, \quad (7)$$

где $d_{ij} = \sigma_{\dot{\xi}}^{-j} \langle \dot{\xi}^i(t) \dot{\xi}^j(t) \rangle$ - квазимоменты. Формула (7) справедлива для процессов $\dot{\xi}(t)$, близких к гауссовым, поэтому можно предположить $d_{ij} = \sigma_{\dot{\xi}}^{-j} \langle \dot{\xi}^i(t) \rangle \langle \dot{\xi}^j(t) \rangle$. С учетом нулевого среднего $m_{\dot{\xi}} = m_{\dot{\xi}} = 0$ и четности функции $\omega(\dot{\xi}) = \omega(-\dot{\xi})$ это условие приводит к значениям $d_{21} \equiv 0$ и $d_{12} \equiv 0$. Тогда формула (7) примет вид

$$N_{\dot{\xi}}^+(c, 1) = \frac{\sigma_{\dot{\xi}}}{2\pi} \exp\left(-\frac{c^2}{2}\right) \left[1 + \frac{d_{30}}{3!} (c^3 - 3c) \right], \quad (8)$$

откуда следует, что для процессов $\dot{\xi}(t)$ с одномерной плотностью вероятности

$$W(\xi) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-\xi^2/2) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} (\xi^3 - 3\xi) \right] \quad (9)$$

известный результат (7) согласуется с полученным выводом (5).

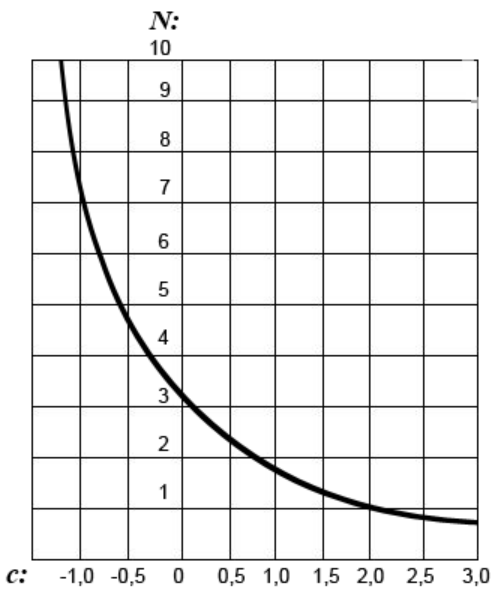


Рисунок 10 - Кривая распределения среднего числа выбросов: c – условные значения уровней (напряжения), N – условное значение среднего числа выбросов (провалов)

но открывать симистор при подаче сетевого напряжения, создана и исследована оригинальная принципиальная электрическая схема, реализующая функции САУ. Это авторское решение защищено патентом России № 59338.

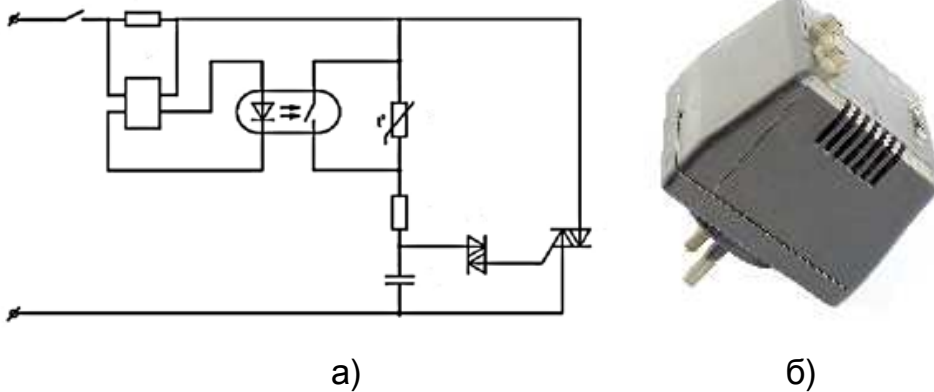


Рисунок 11 - Устройство плавного включения электрической нагрузки: а) - схема, б) - экспериментальный образец

го включения нагрузки разработана и использована экспериментальная установка ускоренных ресурсных испытаний группы мощных облучательных ламп в режиме частых включений, рис. 12.

На практике получены объективные свидетельства эффективности устройств плавной коммутации, сравнительные диаграммы срока службы ламп приведены на рис. 14. Полный срок эксплуатации защищенных ламп составил в среднем от 1219 до 1918 часов при нормативном 50 % сроке службы 1000 часов, увеличение срока эксплуатации составило соответственно от 22 % до 92 %. Несомненно, что такой показатель трудно воспроизвести на реальном объекте, где есть комплекс возму-

Формула (8) также объясняет результат рассмотренного в работе практически важного примера для МЭС при КН. Таким образом, нами дано математическое описание закономерностей изменения нагрузки в МЭС/СМЭС применительно к длительности провалов напряжения.

Сходимость математической модели подтверждена сличением расчетных и фактических показателей t_{Umin} – суммарной длительности работы МЭС на пониженном напряжении, рис. 10.

В четвертой главе «Экспериментальное автоматическое устройство плавной коммутации электрической нагрузки на основе тиристорного фазового регулятора» приведены результаты экспериментов с применением разработанного устройства плавного включения.

На основе стандартной схемы симисторного фазового регулятора, в сочетании с оригинальной фазосдвигающей RC-цепью с динамически изменяемыми параметрами, позволяющей плавно

Разработано, описано и исследовано исполнение устройства плавного включения электрической нагрузки в реальных условиях эксплуатации, рис. 11.

В качестве лабораторного объекта для испытания устройства плавного

8,9%, а эксплуатационные расходы уменьшились на 17,6 %. Расчетный срок окупаемости инвестиций в модернизацию ИО птичника составил 1,62 года.

Таблица 1 Расчет эффективности по приведенным затратам для ИО батареи птичника

Наименование показателей	Обозначение	Ед.измер.	Прямой пуск	Плавный пуск
1. Капитальные вложения	К	руб.	9670,00	10830,40
2. Эксплуатационные расходы (себестоимость)	C_3	руб./год	4320,00	3672,20
3. Приведенные затраты	З	руб./год	5770,50	5296,76

В приложениях помещены экспериментальные данные и результаты оценки качества электроэнергии для различных объектов, а также акты об использовании результатов диссертационной работы на предприятиях и технические требования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены комплексные исследования показателей качества электроэнергии в сети с КН и их влияние на качественные показатели устройств-потребителей электроэнергии. Предложены критерии эффективности МЭС/СМЭС при проектировании оптимальных сетей и их эксплуатации в условиях КН. Результаты, полученные в работе, способствуют повышению технологической эффективности электроустановок, характеризующихся тяжелыми условиями пуска, и в особенности – питающихся от источников соизмеримой мощности, то есть – в условиях КН. Новые электронные блоки плавного включения, синтезированные на основе построенных математических моделей, характеризуются высокими качественными показателями, не требуют доработки существующей пускозащитной аппаратуры. Кроме того, применение новых устройств повышает безопасность и комфортность работы для оператора, находящегося в непосредственном контакте с электроустановкой.

Основные выводы и результаты работы:

1. Проведен сравнительный анализ и систематизация известных способов и устройств плавного пуска электроустановок и синтезировано устройство, реализующие оптимальные функции регулирования, снижающее dU/dt на нагрузке в 3-6 раз.

2. Предложена оригинальная схемотехническая реализация малогабаритного электронного блока плавного включения для работы совместно с существующей ПЗА. Разработаны технические требования на блоки плавного пуска мощностью 750-2100 Вт. Даны предложения по практическому использованию электронных блоков плавного включения нагрузки на объектах АПК.

3. Доказана актуальность проблемы качества электроэнергии для электрических сетей, в которых мощность потребителей соизмерима с мощностью источника – местных электрических сетей (МЭС) и в частности - местных распределительных сетей сельскохозяйственных потребителей (СМЭС) и введено понятие критической нагрузки (КН), соответствующее этому случаю.

4. Исследованы показатели качества и динамические характеристики местной электрической сети в условиях КН, закономерность изменения нагрузки МЭС/СМЭС во времени.

5. Показана связь между способом коммутации и качеством электроэнергии и разработан комплексный показатель качества МЭС/СМЭС на стороне низкого на-

пряжения - суммарная длительность работы МЭС на пониженном напряжении, с нормально допустимым значением 720 с.

6. Создана математическая модель изменения нагрузки в МЭС/СМЭС на базе теории выбросов случайных процессов. На основе математической модели и анализа реальной электрической сети в условиях КН разработана функция регулирования, снижающая пиковые нагрузки.

7. Разработана и апробирована методика ускоренных ресурсных испытаний электрооборудования на примере мощных облучательных / обогревательных установок и получено увеличение ресурса лабораторных установок от 22 % до 92 % с различным темпом плавного пуска.

8. Получено экспериментальное подтверждение технологической и экономической эффективности применения разработки на основе опытно-промышленной эксплуатации на предприятиях АПК, отмечено: снижение пульсации напряжения на 8-10 %; увеличение ресурса электрооборудования на 10-12 %; увеличение продуктивности кур-несушек на 2-3 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бекмачев А.Е., Кондратьева Н.П., Фокин В.В. Тиристорный коммутатор нагрузки // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Журнал. – 2002. - №5. - С. 17-18.

2. Бекмачев А.Е. и др. Аппаратная реализация средств плавной коммутации радиотехнических устройств, устройств связи и навигации // Вестник ИжГТУ / Дзюин С.В., Сидорина В.А., Бекмачев А.Е. – Ижевск: ИжГТУ, 2005. – вып.3. - С. 36-38.

3. Бекмачев А.Е. и др. Электромагнитная совместимость на обособленных объектах радиосвязи в условиях критической нагрузки сети // Вестник ИжГТУ/ Дзюин С.В., Сидорина В.А., Бекмачев А.Е. – Ижевск: ИжГТУ, 2005. – вып.4. - С. 51-53.

4. Пат. 59338 RU МПК Н 02 J 9/06, Н 02 М 5/22. Устройство плавного включения / А.Е.Бекмачев, С.В.Дзюин (Россия). - № 2005135259/22; Заявлено 14.11.05; Оpubл. 10.12.2006, Бюл. № 34. – 5 с.: ил.

5. Пат. 59350 RU МПК Н 04 В 3/46. Анализатор качества канала. / А.Е.Бекмачев, С.В.Дзюин (Россия). - № 2005138708/22; Заявлено 12.12.05; Оpubл. 10.12.2006, Бюл. № 34. – 3 с.: ил.

6. Бекмачев А.Е. и др. Метод моделирования коммуникационного канала на основе теории выбросов случайного процесса // Доклады Томского государственного университета систем управлением и радиосвязи – Томск: Изд-во ТУСУР, 2008. – вып. 2 (18), ч.1 / Дзюин С.В., Мухин К.В., Бекмачев А.Е. – С. 58-61.

7. Бекмачев А.Е. Исследование утечки конфиденциальной информации по цепям питания и заземления // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиосвязи – Томск: Изд-во ТУСУР, 2009. – вып. 1 (19), ч.2, июнь 2009. – С. 13-15.

Публикации в сборниках научных трудов, материалах конференций

8. Бекмачев А.Е. и др. Перспективные системы управления электроприводом в сельском хозяйстве // Труды XXVIII научно-практической конференции ИжГСХА (Ижевск, 18-20 февр. 1998 г.) / Кондратьева Н.П., Фокин В.В., Бекмачев А.Е. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1998. Ч. 3. – С. 46-48.

9. Бекмачев А.Е. и др. Элементная база перспективных систем управления электроприводами для сельского хозяйства // Тр. ин-та / РГАЗУ-агропромышленному комплексу / Бекмачев А.Е., Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Фокин В.В. М.: РГАЗУ, 1998, с.196.

10. Бекмачев А.Е. и др. Энергосберегающие системы управления электроприводом // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Удмуртской Республики: Тез. докл. респ. научно-практической конференции. Ижевск, 18-20 нояб. 1998 г. / Кондратьева Н.П., Фокин В.В., Бекмачев А.Е. - Ижевск: Изд-во Детектив-информ, 1998. – С. 9.

11. Бекмачев А.Е. и др. Устройство плавного пуска асинхронного электродвигателя // Тр. ин-та / Электропривод и энергосберегающие технологии: Научно-практ. конф. ИжГСХА / Трубин В.Г., Фомин Д.В., Бекмачев А.Е. – Ижевск: Изд-во ШЕП, 2000. – С. 10-12.

12. Бекмачев А.Е., Кондратьева Н.П., Фокин В.В. Способы плавной коммутации нагрузки в сетях переменного тока//Тр. ин-та/Электропривод и энергосберегающие технологии: Научно-практ. конф. ИжГСХА.–Ижевск: Изд-во ШЕП, 2000.–С. 12-18.

13. Бекмачев А.Е., Кондратьева Н.П., Фокин В.В. Качество электроэнергии. Проблема «последней мили» // Тр. ин-та / Актуальные проблемы электромеханизации производственных процессов в АПК Удмуртской Республики и пути их решения в условиях современной рыночной экономики: Респ. научно-практ. конф. 30-31 окт. 2001 г. – Ижевск: Изд-во ШЕП, 2001. – С. 27-30.

14. Ляпунов В.А., Бекмачев А.Е. Холодильно-обогревательные установки с микроконтроллерным управлением // Тр. ин-та / Актуальные проблемы электромеханизации производственных процессов в АПК Удмуртской Республики и пути их решения в условиях современной рыночной экономики: Респ. научно-практ. конф. 30-31 окт. 2001 г. – Ижевск: Изд-во ШЕП, 2001. – С. 67-70.

15. Максачев Ю.А., Бекмачев А.Е. Оптимизация потребления электроэнергии при добыче нефти станками-качалками из малодебитных скважин с использованием многоскоростных двигателей // Тр. ин-та / Актуальные проблемы электромеханизации производственных процессов в АПК Удмуртской Республики и пути их решения в условиях современной рыночной экономики: Респ. научно-практ. конф. 30-31 окт. 2001 г. – Ижевск: Изд-во ШЕП, 2001. – С. 70-71.

16. Бекмачев А.Е. и др. Система управления частотой вращения асинхронных электродвигателей // Тр. ин-та / Актуальные проблемы электромеханизации производственных процессов в АПК Удмуртской Республики и пути их решения в условиях современной рыночной экономики: Респ. научно-практ. конф. 30-31 окт. 2001 г. / Таран А.В., Трубин В.Г., Бекмачев А.Е. – Ижевск: Изд-во ШЕП, 2001. – С. 90-92.

17. Бекмачев А.Е., Кондратьева Н.П., Фокин В.В. Автоматические тиристорные пускатели-регуляторы // Тр. ин-та / Аграрная наука на рубеже тысячелетий: Научно-практ. конф. – Ижевск: Изд-во ШЕП, 2001. – С. 182-185.

18. Некрасов В. И., Бекмачев А.Е. Опыт бизнес-планирования для изделий новой техники. План производства регуляторов мощности // Менеджмент: теория и практика. – Ижевск: Изд-во Института экономики и управления УдГУ. – 2005. – № 1/2. – С. 174–177.

19. Бекмачев А.Е. Бизнес-планирование с целью повышения конкурентоспособности изделий новой техники // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства: труды III научно-технической конференции, (Ижевск, 14-15 апреля 2006 г.) / Ижевский государственный технический университет - Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. – С. 53-57.

Подписано в печать "___" _____ 20__ г.
Формат 60x84/16 Гарнитура Times New Roman.
Усл. п. л. ****. Уч.-изд. л. ****.
Заказ № ****. Тираж 100 экз.
ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА
426069 г.Ижевск, ул.Студенческая,11.

