МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. АЛЕКСЕЕВА»

ОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Нижний Новгород 2014

УДК 550.534.524
А 437

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода, эффективности систем электроэнергетики.

Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборнике использованы материалы XXXIII региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

доц. **А.Б. Дарьенков** (отв. редактор), проф. **А.Б. Лоскутов**, проф. **В.Г. Титов**, доц. **А.И. Чивенков**, доц. **Е.В. Бычков**, доц. **А.А. Кралин**, **И.А. Николаев**

УДК 550.534.524

ISBN 978-5-502-00373-5

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Проблемы и перспективы развития электропривода..... 6
Смирнов А.Ю. Электромеханика как научная и образовательная дисциплина: перспективы развития..... 13

Секция 1. **ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ……..** 17

Лоскутов А.Б., Терентьев П.В. Исследование пиковых токов создаваемых источниками света при их коммутации……..... 17
Лоскутов А.Б., Зырин Д.В., Лоскутов А.А., Акимова А.И. Разработка аварийных состояний универсального трехлучевого узла нагрузки распределительной сети..... 21
Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В., Демидова А.С. Программные комплексы автоматизированных систем управления распределительными электрическими сетями.....…… 27
Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Шевченко А.С. Малафеев О.Ю. Методика экономического ранжирования осветительных приборов на основе "совокупной стоимости владения..... 32
Вагин Г.Я., Мамонов А.М., Севостьянов А.А., Солнцев Е.Б., Терентьев П.В. Использование маркировки инженерного оборудования зданий при разработке мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении энергоаудита объектов различного назначения..... 39
Вагин Г.Я., Соснина Е.Н., Солнцев Е.Б., Севостьянов А.А., Мамонов А.М., Петров А.А. Экономический анализ проекта сооружения мини-ТЭЦ или электростанции малой мощности в системах электроснабжения..... 43
Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Асташев Д.С. Опыт применения напряжения 20 кВ в распределительных электрических сетях..... 49
Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Смирнов А.А. Методы оценки статической устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией..... 53
Соснина Е.Н., Крюков Е.В., Веселов Л.Е. О применении энергоустановок на основе ТОТЭ для электроснабжения ответственных потребителей..... 58
Сугаков В.Г., Тощев А.А., Малышев Ю.С. Оценка и коррекция небаланса напряжений в системах электроснабжения с автономными источниками электроэнергии..... 61
Куликов А.Л., Петрова В.А., Заикина Н.С. Оценка параметров аварийных токов и напряжений для устройств релейной защиты в условиях изменения частоты и упрощенной цифровой фильтрации..... 66
Аверьянова К.С., Степанов В.П., Соляков О.В. К оценке расчетных потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные промышленные установки..... 72
Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Петров А.А. Разработка критериев оценки эффективности выбора параметров мини-ТЭЦ..... 76
Гардин А.И., Кисель Д.А. Исследование нормальных режимов работы сети..... 89
Гардин А.И., Кисель Д.А. Универсальный стенд для проведения экспериментальных исследований физических моделей регулирования потоков мощности..... 94

Дудникова Л.В., Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Севостьянов А.А. Оценка потенциала внедрения оборудования, имеющего маркировку в бытовом секторе, бюджетном секторе и на других объектах энергопотребления (зданиях)..... 99

Макарова Ю.М., Маслова А.А., Осокин В.Л. Снижение потребления электроэнергии в производстве сельскохозяйственной продукции..... 106

Аверьянова К.С., Безменова Н.В. Экспериментальные исследования напряженности магнитного поля промышленной частоты в КРУ - 6(10) кВ..... 109

Секция 2. **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД……** 114

Хватов О.С., Тарпанов И.А. Математическая модель судовой единой электроэнергетической установки..... 114

Колосов Р.В., Мирясов Г.М., Титов В.Г., Ходыкина И.В. Обоснование выбора соотношения мощностей возобновляемых источников энергии..... 118

Ломакина Л.С., Мешков А.Н., Титов В.Г., Мирясов Г.М., Кузменков А.Н. Система управления электромагнитными подшипниками мощных вращающихся агрегатов..... 122

Ломакина Л.С., Садиков Д.Г., Титов В.Г. Энергосберегающий регулируемый электропривод газоперекачивающего агрегата..... 127

Мальцев А.Н., Хватов О.С. Экономическое обоснование применения частотного регулирования на канализационных насосных станциях..... 134

Дарьенков А.Б., Поляков И.С., Гузев С.А. Имитационная модель высокоэкономичной автономной генераторной установки переменной частоты вращения с интеллектуальной системой управления..... 139

Дарьенков А.Б., Курицын Д.Б., Соколов В.В. Мобильные устройства в системах управления нижнего и верхнего уровня..... 143

Бадугин Д.А., Бычков Е.В., Дарьенков А.Б., Мельников В.Л., Соколов В.В. Испытательный стенд задатчика экономичного режима ветро-дизель-электрической станции..... 147

Бинда К.А., Мешков А.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю. Учет потерь и генерируемой мощности искажений электромеханического фильтра..... 151

Уснунц-Кригер Т.Н., Смирнов А.Ю. Модуляция тока фазы вентильного реактивного двигателя для минимизации пульсаций крутящего момента..... 155

Башев А.А. Вопросы выбора математических моделей динамических систем..... 161

Стеклов А.С. Характерные дефекты судового синхронного генератора и причины их возникновения..... 163

Стеклов А.С., Ершова Е.А. Применение экспертных систем для обработки результатов диагностирования..... 166

Репин А.С., Гуляев В.В., Кралин А.А. Система электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с дискретно-импульсным преобразователем энергии..... 170

Секция 3. **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ…..** 174

Дарьенков А.Б., Варыгин И.А. Разработка входного фильтра матричного преобразователя частоты..... 174

Вихорев Н.Н., Панфилов И.С., Чивенков А.И., Панфилов С.Ю. Устройство поэлементного измерения напряжения аккумуляторной батареи..... 179

Вихорев Н.Н., Панфилов И.С., Чивенков А.И., Панфилов С.Ю. Система автономного электропитания с топливным элементом и буферным накопителем..... 182
Вихорев Н.Н., Панфилов И.С., Чивенков А.И., Панфилов С.Ю. Схема управления силовым транзистором на основе однотактного трансформаторного преобразователя..... 186
Богатырев В.В. Индукционные регуляторы тока с подвижной обмоткой..... 189
Байков А.И., Сбитнева С.Г. Разработка банка данных для анализа тепловых режимов силовых полупроводниковых приборов..... 194
Башев А.А. Об исследовании нелинейной системы с фазовым управлением..... 198
Кралин А.А., Гуляев В.В. Моделирование параллельной работы трехфазных многообмоточных трансформаторов в Simulink..... 201

УДК 62-83-52.001

Г.Б. ОНИЩЕНКО, М.Г. ЮНЬКОВ

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Московский государственный университет машиностроения
ООО «Электротехническая промышленная компания»

Рассматриваются тенденции и проблемные вопросы развития электропривода.

***Ключевые слова*:** электропривод, энергоэффективность, области применения, подготовка специалистов.

Энергетика и информационные технологии определяют сегодня уровень социального развития общества и состояние экономики всех стран мира.

Тематика нашей конференции тесно связана с проблемами электроэнергетики, так как электропривод продолжает оставаться крупнейшим потребителем электроэнергии. В настоящее время в мире ежегодно вырабатывается около 13 трлн. кВтч электроэнергии. В России в настоящее время 700 электростанций общей мощностью 227 ГВт; в 2012 г. было выработано 1070 млрд. кВтч.

Темпы роста выработки электроэнергии в развитых странах в последние годы замедлились. В странах Европы рост выработки электроэнергии составляет порядка 1% в год. Большее внимание уделяется составу и качеству электрогенерирующих установок с целью повышения их КПД и снижения вредной нагрузки на окружающую среду.

В то же время приоритетной задачей во всех развитых странах мира является сегодня повышение энергоэффективности и энергосбережение, как основной путь установления рационального баланса между производством электроэнергии и ее потреблением.

Для России энергосбережение особенно актуально, поскольку наша страна имеет весьма высокую удельную энергоемкость ВВП, втрое превышающую этот показатель в странах Европы и Японии, в 2,3 – в целом по миру. Высокий уровень энергопотребления при малом темпе роста ВВП определяется большой энергозатратностью основных производственных технологий и недооценкой задач энергосбережения. Несмотря на принятый в 2009 г. закон РФ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности», который устанавливал снижение энергоемкости ВВП к 2020 г. на 40%, реальное снижение энергоемкости происходит меньшими темпами, и сегодня это задание уже скорректировано до 22% [5]. Основная причина – отсутствие государственного системного подхода к задачам энергосбережения; при этом сокращение энергетических затрат вступает в противоречие с интересами монополий нефтегазового комплекса.

Обычно рассматривают необходимость повышения энергоэффективности на уровне производства электроэнергии и ее передачи на дальние расстояния. Вся тематика докладов на XII Всемирном электротехническом конгрессе была посвящена этим вопросам [1]. Не менее важно, на наш взгляд, обращать внимание на необходимость повышения энергоэффективности и энергосбережения в сфере использования электроэнергии, прежде всего, в сфере электропривода, как основного ее потребителя.

Здесь следует отметить три тенденции:

1. Повышение энергоэффективности самих технологических процессов за счет их энергетической оптимизации благодаря применению регулируемого электропривода и систем технологической автоматики.

2. Создание новых малоэнергоемких технологических процессов, использующих высокоточные электроприводы и микропроцессорные системы автоматического управления.

3. Повышению КПД собственно электропривода за счет применения энергосберегающих электродвигателей и силовых полупроводниковых преобразователей с высокими энергетическими характеристиками.

Говоря о возможностях энергосбережения в электроприводе, следует также упомянуть о необходимости более рационального выбора установленной мощности электродвигателей. На большинстве работающих промышленных установок мощность электродвигателей завышена на 20-40%. Современные компьютерные средства расчета позволяют, казалось бы, более точно рассчитывать установленную мощность электрооборудования, что дает не только сокращение первоначальных затрат, но и сокращает расход электроэнергии при эксплуатации.

Электрический привод, как вид электротехнической продукции, имеет свои характерные особенности, определяющие его значение для инновационного развития экономики страны:

- автоматизированный электропривод является энергетической и интеллектуальной основой современного машинного производства; развитие машиностроения, транспорта и ряда других отраслей и технологий невозможно без адекватного (а то и опережающего) развития техники электропривода;
- как основной потребитель электроэнергии электропривод является частью электроэнергетического комплекса, во многом определяя эффективность использования электроэнергии в машинном производстве и оказывая влияние на системы передачи и распределения электрической энергии;
- электропривод – это наукоемкая отрасль техники, его развитие базируется на последних достижениях фундаментальной науки; физики твердого тела, силовой электронике, микропроцессорной технике, электромеханике, теории автоматического управления и др.; создание электроприводов требует проведения теоретических и экспериментальных исследований, компьютерного моделирования;

- для этого вида продукции характерны постоянное развитие, быстрая сменяемость поколений, генераций; короткие сроки морального устаревания;
- указанные особенности определяют необходимость достаточно высокой квалификации работников на всех стадиях жизненного цикла этой электротехнической продукции: разработки, производства, маркетинга и эксплуатации.

В связи с отмеченными особенностями рассмотрим пути развития электропривода и возникающие при этом проблемы.

Как новое и эффективное направление развития следует отметить расширение областей применения электропривода на сферу транспорта. Это направление настолько масштабно, что формируется новая подотрасль электротехнического производства – электротехнические комплексы для электромобилей различных классов и кинематических схем.

Автомобилестроение по своей структуре рассчитано на крупносерийное производство. Если в предыдущие годы во многих странах велись отдельные разработки электромобилей и производились они малыми партиями, то в последние два года начался переход к серийному производству электромобилей, как гибридных, так и зарядных, причем не только специальных автомобилей, но и легковых машин для массового потребителя.

Евросоюз выделил 80 млрд. евро на развитие электромобилестроения и соответствующей структуры зарядной сети [3]. Согласно директиве ЕС к 2020 г. будет изготовлено 5 млн. электромобилей. Указывается, что массовое использование электромобилей преследует 3 цели:

- экономию первичного топлива;
- существенное улучшение экологической ситуации;
- снижение затрат на эксплуатацию автотранспорта.

В США на развитие электромобильного транспорта выделено 2,4 млрд. долларов. В России ведутся отдельные разработки в области электрического транспорта и других колесных машин. Эти разработки будут представлены в докладах на конференции.

Широкое развитие электромобильной техники ставит новые задачи в области системотехники электропривода с автономным питанием, в области электромеханики – создание мотор-колес, в том числе синхронных с возбуждением от постоянных магнитов; аккумуляторных батарей, в том числе на основе ионно-литиевых аккумуляторов, создание полупроводниковых преобразователей типа dc-dc, систем автоматического согласованного индивидуального управления мотор-колесами автомобиля и многие другие.

Следует отметить, что масштабное использование электромобилей делает актуальной проблему автоматизации движения транспорта. На фирме General Motors уже работает лаборатория по созданию автомобиля будущего, который будет работать без водителя.

Развитие электропривода в сфере транспорта не ограничивается колесным транспортом (рельсовый колесный транспорт, как самостоятельную подотрасль техники мы рассматривать не будем). Интенсивное развитие получает применение регулируемого электропривода на водном транспорте. На судах и кораблях начинают широко применять для повышения эффективности автономных энергетических установок силовые полупроводниковые преобразователи, в том числе для частотно-регулируемого электропривода. Регулируемыми приводами оснащаются насосные агрегаты различного назначения, грузоподъемные механизмы и системы электродвижения и подруливания судов. Автономное электроснабжение и условия морского климата накладывают соответствующие требования на судовые электроприводы.

Тенденции все большей электрификации транспортных средств вероятно в будущем коснуться и авиации. Как знаменательное событие следует отметить, что в июле 2010 г. самолет Solar Impulse на солнечной энергии успешно совершил непрерывный круглосуточный полет [4].

Мы обратили внимание на развитие электроприводного транспорта как на относительно новое направление. В то же время основной тенденцией развития электропривода остается все более широкое использование регулируемого электропривода во всех отраслях промышленности и жизнеобеспечения. Эта общемировая тенденция активно проявляется и в нашей стране. Использование регулируемого электропривода позволяет следующее:

- обеспечение технологических требований данного машинного производства;
- обеспечение высокого уровня качества производимой продукции и сохранение стабильности этого качества;
- энергосбережение при реализации многих энергоемких технологий; это, прежде всего, относится к технологиям горячего и холодного водоснабжения; примерно 18-20 % всей вырабатываемой энергии приходится на электропривод насосных агрегатов; достаточно сказать, что в себестоимости водопроводной воды 45% приходится на оплату электроэнергии; при этом мировым опытом доказано, что замена нерегулируемого электропривода насосных агрегатов на регулируемый обеспечивает реальную экономию электроэнергии, доходящую до 20-30 %;
- важным достоинством плавного регулирования скорости мощных насосных агрегатов является повышение сохранности механического и гидравлического оборудования, в том числе исключение порывов трубопроводов;
- использование частотно-регулируемого электропривода для всех двигателей, особенно средней и большой мощности, исключает негативные последствия, связанные с прямым пуском двигателей переменного тока.

Широкое использование частотно-регулируемого электропривода дает несомненные технико-экономические положительные результаты, однако оно вызвало серьезные трудности, связанные с вопросами электроснабжения и влиянием преобразователей частоты на питающую сеть. Эту проблему, которая

является наиболее серьезной на пути массового использования полупроводниковых преобразователей, называют не вполне точно проблемой электромагнитной совместимости.

Существо этой проблемы состоит в том, что в линиях питания полупроводниковых преобразователей происходит искажение формы токов, в составе которых появляются высшие гармоники. Это приводит ко многим негативным последствиям, связанным с нарушением качества электроэнергии в сети, питающей преобразователи, главные из которых:

- перегрев силовых трансформаторов;
- влияние преобразователей друг на друга при их работе от одной распределительной сети;
- нарушение работы других приемников электроэнергии, питающихся от данной сети;
- дополнительные потери электроэнергии и др.

Положение осложняется тем, что полупроводниковые преобразователи встраиваются в структуру уже существующих распределительных сетей, что ведет к параллельной работе большого числа преобразователей, перегрузке трансформаторов и затрудняет использование фильтро-компенсирующих устройств.

На многих предприятиях, широко использующих частотно-регулируемые электроприводы, ситуация с качеством электроэнергии достаточно острая. Необходим поиск путей и технических средств для решения возникших проблем и исключения их в будущем. Возможны несколько направлений:

- создание преобразователей частоты со сниженным влиянием на питающую сеть (например, активные выпрямители);
- проектирование системы электроснабжения и распределения электроэнергии, учитывающее наличие нелинейных нагрузок и предусматривающее средства фильтрации гармоник; это потребует дополнительных затрат, но они неизбежны;
- представляются перспективными идеи, связанные с переходом на распределение энергии в пределах предприятия (цеха, судна и т.п.) на постоянном токе; в своем выступлении на II Форуме «Электротехника» представитель фирмы ABB сказал, что ими ведется подготовка такой концепции, и она будет вполне реальной после 2020 года.

Как новое и, возможно, перспективное техническое решение, можно отметить использование накопителей электроэнергии в распределительных сетях или непосредственно в составе электропривода. Смысл использования накопителей состоит в выравнивании графика нагрузки энергоемкими потребителями. Например, крупные насосные станции систем водоснабжения, если насосные агрегаты оснащены регулируемым приводом, в ночное время потребляют электроэнергию на порядок меньше, чем в дневное. Поэтому, если в ночное время запасать энергию в накопителе, а в дневное – отдавать, то это даст значительный энергетический и экономический эффект.

В качестве накопителей энергии могут быть использованы аккумуляторы (подобные разработки имеются в Китае), суперконденсаторы и маховичные электромеханические накопители. Конструкции последних в настоящее время интенсивно разрабатываются.

Конференция проходит в центре отечественной силовой полупроводниковой преобразовательной техники и вопросам создания и производства новых типов силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе будет уделено первостепенное внимание.

Силовая электроника является сегодня важнейшей подотраслью электротехники и развивается во всем мире рекордно быстрыми темпами. Появляются новые управляемые приборы, повышаются их параметры, что открывает все новые возможности создания высокоэффективных устройств преобразования электрической энергии большой мощности и достаточно высокого напряжения.

Эти вопросы будут освещены в последующих докладах. Следует лишь отметить, что чрезвычайно важным является освоение отечественного производства IGBT-транзисторов высоких параметров и других управляемых приборов. Это позволит начать решать задачу импортозамещения, к чему призывает Президент РФ В.В.Путин, и повысит конкурентоспособность отечественной электротехнической продукции.

В современном электроприводе интенсивно развиваются функции управления. Происходит интеллектуализация этой электромеханической системы. Разработаны алгоритмы и программные продукты, позволяющие реализовать практически любые законы регулирования, как координат электропривода, так и контролируемых технологических параметров. Микропроцессорные системы обеспечивают новые свойства систем регулирования: адаптацию к изменяющимся условиям, самонастройку регуляторов, диагностику, прогнозируемое управление и защиту, и другие интеллектуальные задачи.

Обратимся теперь к вопросам кадрового обеспечения отрасли. Знаковое событие произошло 23 июня 2014г., когда на заседании Совета по науке и образованию Президент РФ В.В.Путин обратил внимание на резкий дефицит инженерных кадров в стране и на серьезные недостатки в системе высшего инженерного образования. Об этих кардинальных проблемах в последние годы постоянно говорили специалисты и руководители предприятий. Особенно отрадно, что наконец-то прозвучало слово «инженер». Сказанное особенно актуально для технически сложных отраслей экономики, в том числе электротехники.

На I Всероссийском деловом Форуме «Электротехника» задачей № 1 было определено преодоление кадрового голода на предприятиях электротехнической промышленности с учетом обеспечения «кадровой компетентности» [2].

При подготовке ко II Всероссийскому Форуму «Электротехника» в мае 2014 г. был проведен экспертный опрос по ключевым проблемам электротехнической отрасли России. В опросе приняли участие 350 владельцев и директоров предприятий электротехнической промышленности. 47 % респондентов считают наиболее острой проблему кадрового дефицита [3].

В докладе на I Форуме «Электротехника» мы предложили следующие основные пути решения кадровой проблемы:

1. Создать государственную систему отслеживания потребности в специалистах электротехнического профиля различного уровня квалификации и прогнозировать динамику изменения этой потребности.

2. Минобрнауки РФ следует перейти (как это сделано для ряда важнейших направлений подготовки инженеров) от подготовки бакалавров к подготовке специалистов по специальности 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

3. Наилучшие результаты в подготовке инженеров-электриков могут быть достигнуты на основе долговременного сотрудничества вузов и предприятий. Это – целевой прием, согласование учебных программ, проведение производственных практик, оснащение лабораторий за счет предприятий, содействие в трудоустройстве.

4. В свете сказанного Президентом совершенно неадекватной представляется жестко проводимая Минобрнауки РФ линия на полное закрытие в стране заочного технического образования; именно заочная подготовка инженеров из числа работающих по специальности позволит быстро хотя бы частично решить кадровую проблему.

5. Постоянная смена поколений электротехнической продукции, широкое внедрение силовой и микропроцессорной электроники, принципиально новых видов электрооборудования определяют настоятельную необходимость непрерывного обновления знаний и переподготовки инженерного и технического состава. Основой для повышения квалификации должно стать создание в университетах, имеющих электротехнические факультеты, подразделений повышения квалификации. Для крупных электротехнических предприятий эффективно создание собственных курсов повышения квалификации, имея в виду переподготовку не только своего персонала, но и работников предприятий, использующих производимую электротехническую продукцию. Положительный опыт здесь имеется у предприятия ЭКРА г. Чебоксары.

6. Необходимо расширить издание учебной, учебно-методической и справочной литературы (в том числе электронной), специально ориентированной на самоподготовку, переподготовку и повышение квалификации специалистов электротехнического профиля.

Большинство приведенных рекомендаций в полной мере корреспондируются с теми указаниями, которые дал Президент РФ по итогам обсуждения вопроса дефицита инженерных кадров в стране 23 июня 2014 г.

Во вводном докладе авторы не приводили обзор новых прогрессивных технических решений в области электропривода и его средств, а сосредоточили внимание на основных проблемных вопросах, связанных со значимостью развития автоматизированного электропривода для модернизации экономики страны. Конкретные научно-технические вопросы будут раскрыты в последующих докладах.

Библиографический список

1. Сборник докладов XII Всемирного электротехнического конгресса – М.: 2011.
2. Рабочие материалы I Всероссийского форума «Электротехника – бизнес – стратегия 2013». – М.: http://electro-forum.ru
3. Рабочие материалы II Всероссийского форума «Электротехника – бизнес – стратегия 2014». - М.: http://electro-forum.ru
4. **Папков, Б.В.** Становление и развитие электротехники и электроэнергетики – Нижний Новгород, Изд-во Кварц, 2011.
5. Энергоэффективная Россия, 2013, № 1.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. СМИРНОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА КАК НАУЧНАЯ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДИСЦИПЛИНА: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассматриваются важные дополнения к классической теории электрических машин при формировании современного курса по электромеханике. Затронуты направления развития этой дисциплины, которые могут стать интересными темами учебных и исследовательских работ.

Ключевые слова: электромеханика, электрические машины, электропривод, электромагнитный момент, сеточная модель.

Электромеханика как фундаментальная дисциплина электротехники и электроэнергетики сформировалась в современном изложении во второй половине XX века. В этот период были изданы фундаментальные труды по основам теории, проектированию и обобщённой теории электрических машин, электромагнитным расчётам.

С тех пор современная теория и практика в электромашиностроении и электромеханике во-многом выходит за рамки классической теории электрических машин. Можно отметить следующие тенденции:

- всё более тесное взаимодействие машины с устройствами силовой электроники и преобразовательной техники, которая проявляется практически во всех областях электромеханики: регулируемый частотный электропривод на базе асинхронных, бесконтактных синхронных двигателей, бесконтактных двигателей постоянного тока, асинхронные генераторы, электромагнитные подшипники;
- освоение в промышленных масштабах новых типов электрических машин, таких как электромагнитные подшипники, и внедрение технических решений, отличающихся от традиционных;

- внедрение в повседневную практику инженеров и исследователей мощных средств вычислительной техники и специального программного обеспечения, позволяющего на стадии разработки выполнять глубокие расчётно-экспериментальные исследования машин и электроприводов на их основе.

В этих условиях содержание курсов “Электромеханика” и “Электрические машины”, а также существующих специальных курсов по электрическим машинам даёт, прежде всего, качественное описание электромеханических процессов, необходимое для понимания их физической сущности. Количественное соответствие в настоящее время достигается компьютерным моделированием на основе фундаментальных методов и эмпирических зависимостей, позволяющих учитывать нелинейность электрических и магнитной цепей машины [1].

Уравнения классической теории электрических машин в комплексах этих устройств требуется дополнить или адаптировать с целью учёта параметров и характеристик усилителей мощности, инверторов, регуляторов и других электронных приборов, присоединяемых к обмоткам машины. В этой связи электромеханика является наукой развивающейся, поскольку конструкторская мысль и прогресс в области силовой электроники порождают всё новые и новые технические решения, требующие математического обоснования и количественных оценок.

Кроме того, исследовательский и инженерный анализ процессов в самой машине также приобретает всё более углублённый характер. Вот минимальный перечень проблем, представляющих научный и практический интерес в настоящее время:

- анализ влияния высших гармоник тока и напряжения, связанных с инвертированием напряжения и тока, на характеристики двигателей;
- ограничение пульсаций электромагнитного момента синхронных двигателей и обеспечение плавного движения ротора;
- совмещённый электромагнитный и тепловой анализ электрических машин;
- проектирование определённых модификаций бесконтактных двигателей и генераторов, востребованных промышленностью [2];
- разработка конструкций и моделей расчёта нестандартных электрических машин, обладающих преимуществами для определённых узконаправленных областей применения.

Приведу некоторые примеры таких задач. Для вертикального перемещения и позиционирования в заданном положении регулирующих органов ядерных реакторов используется привод на базе бесконтактной синхронной машины (рис. 1). Машина получает питание в виде импульсов напряжения или тока, т.е. используется в качестве шагового двигателя [1]. Для ограничения скорости опускания РО применяют шаговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. В этих условиях интересную возможность создать дополнительный запас электромагнитного момента синхронной машины на перемещение и тор-

можение РО при движении регулирующего органа в нужных направлениях обеспечивается за счёт использования асимметричного ротора (рис. 2).

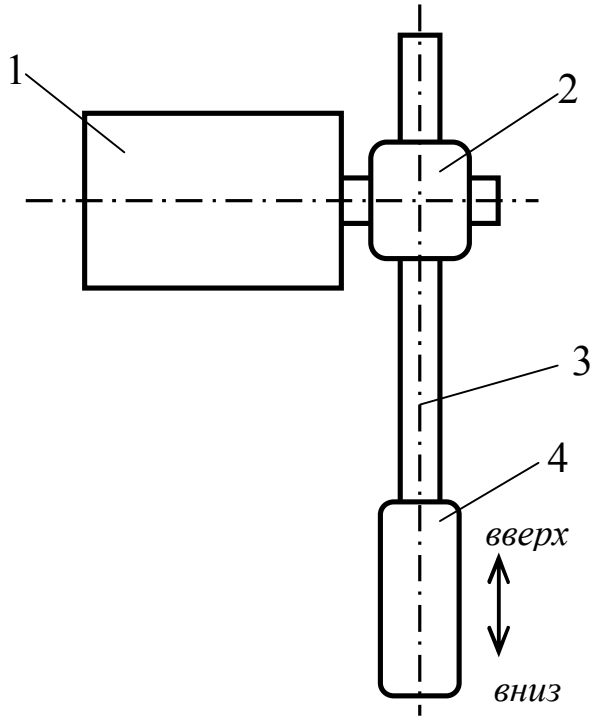


Рис. 1. Электропривод для вертикального перемещения РО (схема конструкции)
1 – шаговый двигатель, 2 – редуктор,
3 – зубчатая рейка, 4 – регулирующий орган

В результате при вращении ротора на подъём регулирующего органа электромагнитный момент машины возрастает. При вращении в противоположном направлении момент снижается, но это снижение компенсируется моментом от веса регулирующего органа, приложенным в ту же сторону.

Широкое поле для исследований электропривода численными методами открывается благодаря тому, что современные средства преобразовательной техники позволяют сформировать, с определёнными ограничениями, практически любую форму тока в фазах машины, какая требуется. Это позволяет отделить электромеханическую задачу определения параметров движения привода от чисто электрической задачи расчёта токов в фазах обмоток. Можно предварительно назначить ту форму тока в фазах, которую мы хотим видеть, например, исходя из условия минимизации момента и плавности движения.

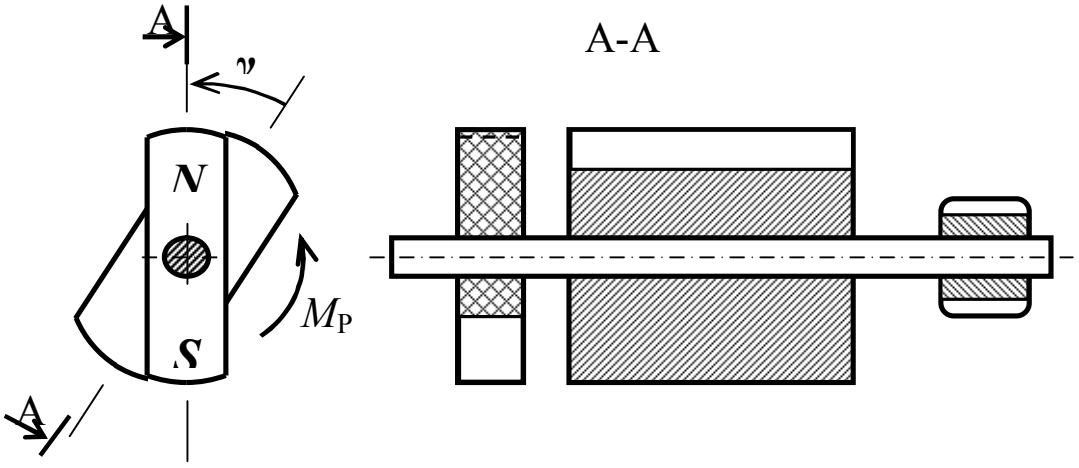


Рис. 2. Асимметричный ротор двигателя – генератора

Такой подход позволяет осуществлять глубокую детализацию электродвигателя в модели электропривода и за счёт этого количественно исследовать переходные режимы работы механизмов. В частности, для максимально полного представления электродвигателя в уравнения электропривода может быть внедрена его сеточная модель (рис. 3) [3]. За счёт этого достигается максимально

точное определение электромагнитного момента в электромеханическом переходном процессе, а значит и наибольшая достоверность вычислительного эксперимента.

Конечно, для циклического вычисления при интегрировании скорости и перемещения сеточная модель двигателя должна быть достаточно простой, а значит двухмерной. Методы сведения трёхмерных моделей электрических машин к двухмерным, там, где такое замещение не является очевидным, также могут представлять предмет серьёзного анализа [4].

В области электроэнергетики представляет интерес проблема генерирования реактивной мощности и регулирования полезной нагрузки автономного асинхронного генератора. Она может быть решена с использованием преобразователя с активным выпрямителем и активным инвертором напряжения. Оба эти устройства работают в режиме широтно-импульсной модуляции. Выпрямитель преобразует напряжение генератора в стабилизированное напряжение на конденсаторе, которое преобразуется в напряжение сети с заданными параметрами по основной гармонике на нагрузке.

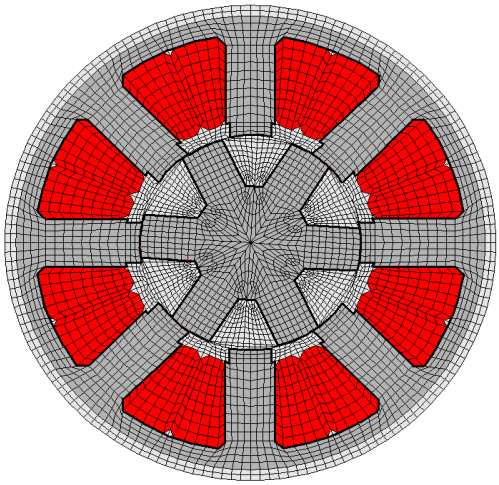


Рис. 3. Сеточная модель синхронной машины

Проработка идей и решений по проблемам электромеханики могут стать содержанием актуальных дипломных работ и дальнейших исследований для студентов старших курсов, магистров и аспирантов.

Библиографический список

1. **Смирнов, А.Ю.** Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): учебное пособие для вузов /А.Ю. Смирнов – М.: Изд-во Форум, – 2014, 192с.
2. **Смирнов, А.Ю.** Проектирование индукторных двигателей с самовозбуждением для частотного привода //А.Ю.Смирнов, Т.Н. Уснунц-Кригер – Электричество. – 2012. - №5. С. 50-56.
3. **Смирнов, А.Ю.** Применение сеточных моделей для исследования электропривода на базе индукторной машины.//А.Ю.Смирнов – Электротехника. – 2009. - №2. С. 28-32.
4. **Смирнов, А.Ю.** Исследование момента герметичной индукторной машины.//А.Ю.Смирнов – Электротехника. – 2007. - №1. С. 51-55.

Секция 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

УДК 658.26

А.Б. ЛОСКУТОВ, П.В. ТЕРЕНТЬЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИКОВЫХ ТОКОВ СОЗДАВАЕМЫХ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА ПРИ ИХ КОММУТАЦИИ

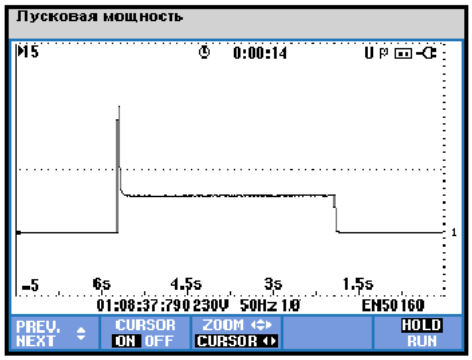
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено исследование пусковых токов во время включения и отключения различных энергосберегающих ламп и светильников и ламп накаливания, применяемых в служебных и жилых зданиях. Представлены результаты исследования пиковых токов создаваемых различными источниками света. Наибольшие пусковые токи создают светодиодные лампы (СДЛ), в некоторых случаях пусковой ток достигает 8 $I_{ном}$.

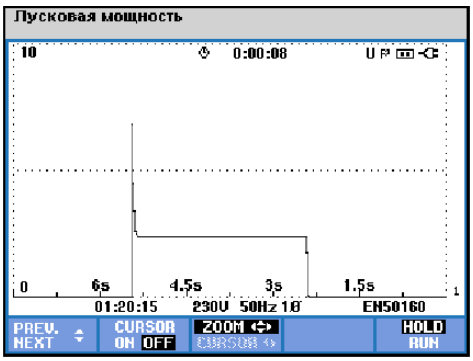
***Ключевые слова*:** источники света, пусковые токи, энергосберегающие лампы, осциллограммы токов.

Согласно результатам исследований, приведенным в [1] новые энергосберегающие лампы имеют значительные пусковые токи. Для ламп с корректором гармоник (ККМ) пусковой ток равен (30-100) $I_{ном}$, а без ККМ (10-30) $I_{ном}$. Такие большие пусковые токи могут приводить к срабатываниям защитных аппаратов и отключению ЭП. При больших пусковых токах также возникают глубокие посадки напряжения, что может приводить к отключению компьютерной техники и сбою их памяти.

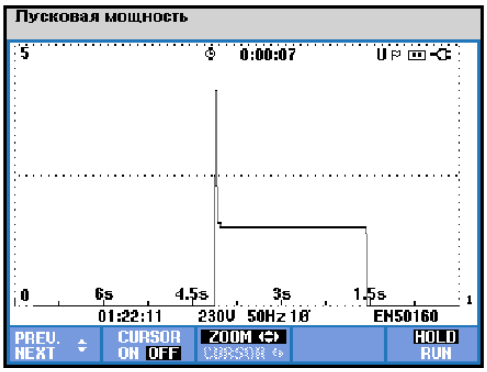
Авторами проведено исследование осциллограмм токов в процессе включения и отключения различных энергосберегающих ламп [2, 3] и ламп накаливания. На рис. 1 приведены осциллограммы токов включения и отключения, а в табл. 1 результаты исследования.



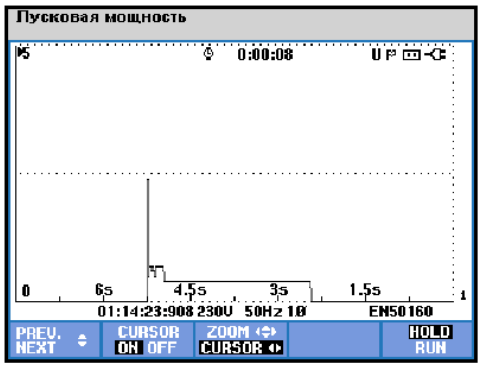
а) ЛН Philips (75Вт)



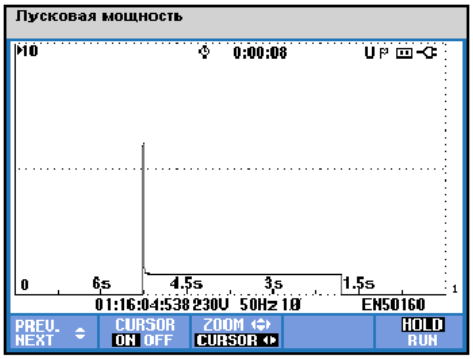
б) ЛН Philips (60Вт)



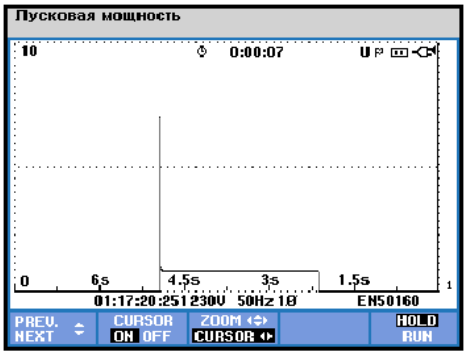
в) ЛН Philips (40Вт)



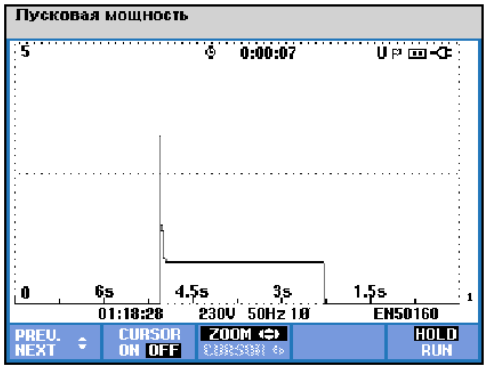
г) КЛЛ NetHaus (13Вт)



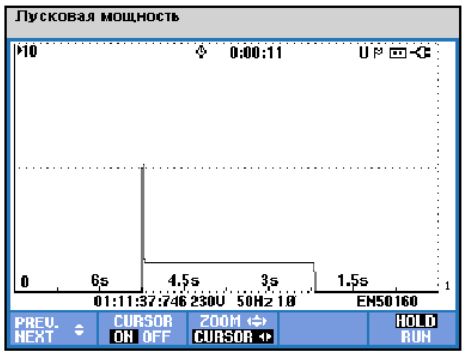
д) КЛЛ Navigator (13Вт)



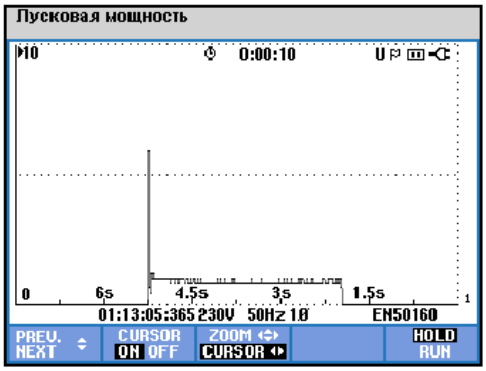
е) КЛЛ Nakai (15Вт)



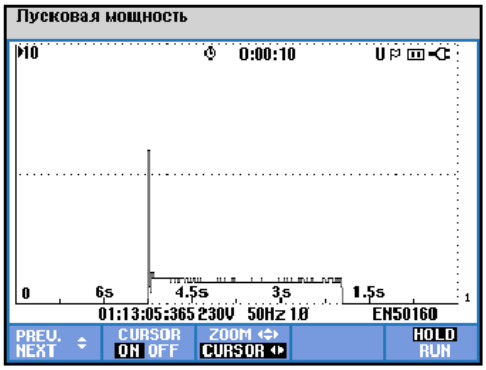
ж) КЛЛ Econom (15Вт)



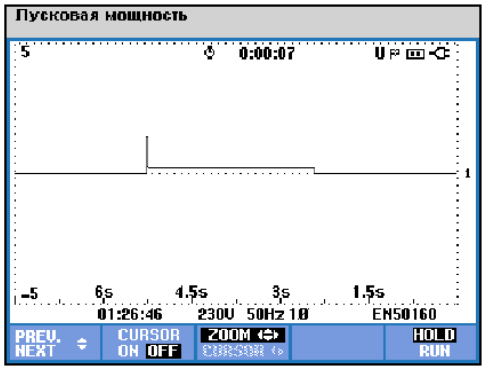
з) КЛЛ Navigator (20Вт)



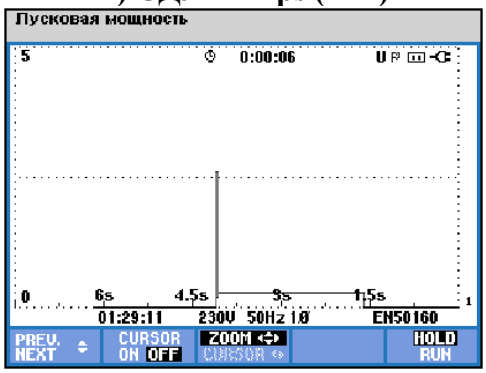
и) КЛЛ ASD (20Вт)



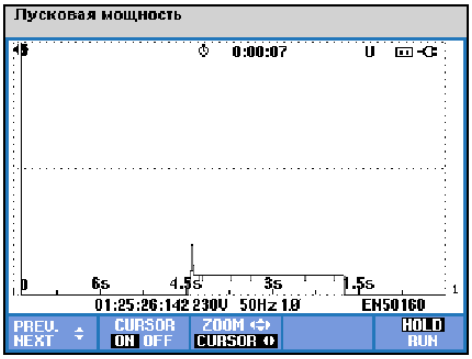
л) КЛЛ ASD (20Вт)



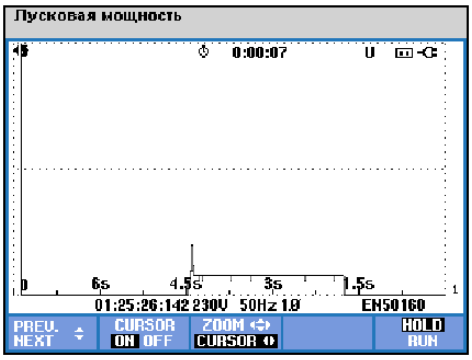
н) СДЛ Philips (4Вт)



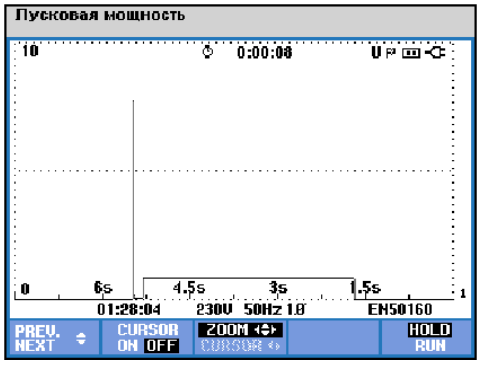
п) СДЛ Philips (5Вт)



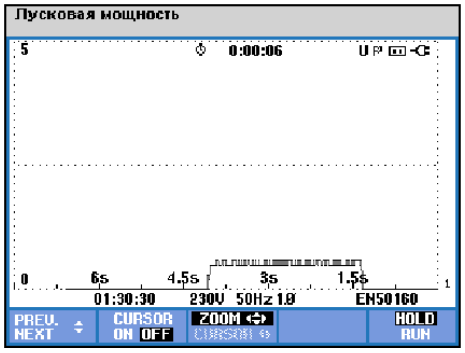
к) СДЛ Ledare (10Вт)



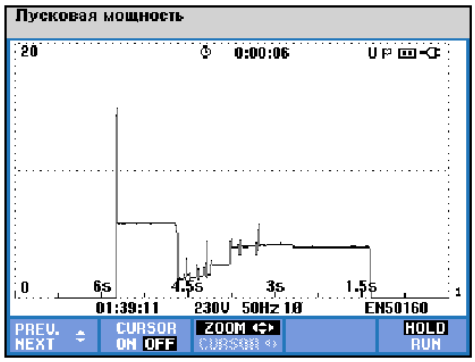
м) СДЛ Ledare (10Вт)



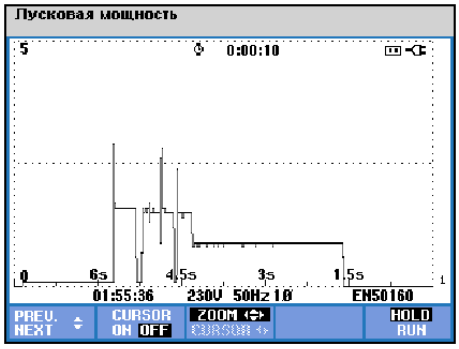
о) СДЛ Navigator (10Вт)



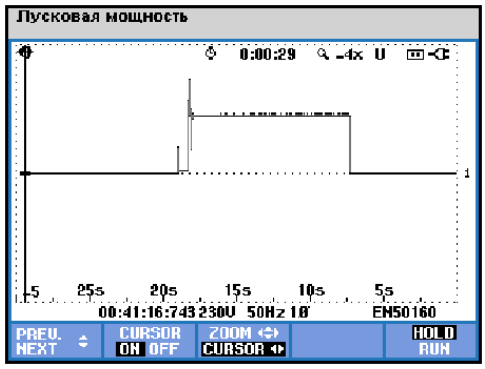
р) СДЛ Philips (13Вт)



с) Светильник с ЛЛ 4х18 ЭмПРА (72 Вт)



т) Светильника местного освещения с ЛЛ ЭмПРА (11Вт)



у) Светильник наружного освещения светодиодный LC STREET-55 (55 Вт)

Рис. 1. Осциллограммы токов включения и отключения

Таблица 1

№ п/п	Наименование источника света	Пусковой ток, А
1	ЛН Philips (75 Вт)	Imax=3.33*Iном=3.33*0.341=1.136 А
2	ЛН Philips (60 Вт)	Imax=3.5* Iном=3.5*0.273=0.956 А
3	ЛН Philips (40 Вт)	Imax=2* Iном=2*0.182=0.364 А
4	КЛЛ NetHaus (13 Вт)	Imax=4* Iном=4*0.078=0.312 А
5	КЛЛ Navigator (13 Вт)	Imax=6* Iном=6*0.084=0.504 А
6	КЛЛ Nakai (15 Вт)	Imax=7* Iном=7*0.0865=0.606 А
7	КЛЛ Econom (15 Вт)	Imax=3* Iном=3*0.097=0.291 А
8	КЛЛ Navigator (20 Вт)	Imax=5* Iном=5*0.116=0.58 А
9	КЛЛ ASD (20 Вт)	Imax=6* Iном=6*0.092=0.552 А
10	СДЛ Ledare (10 Вт)	Imax=2* Iном=2*0.062=0.124 А
11	СДЛ Philips (4 Вт)	Imax=4* Iном=4*0.036=0.144 А
12	СДЛ Navigator (10 Вт)	Imax=8* Iном=8*0.070=0.560 А
13	СДЛ Philips (5 Вт)	Imax=4* Iном=4*0.039=0.156 А
14	СДЛ Philips (13 Вт)	Imax=1* Iном=1*0.083=0.083 А
15	Светильник с ЛЛ 4х18 ЭмПРА (72 Вт)	Imax=4,75* Iном=4,75*0.480=2.280 А
16	Светильник местного освещения с ЛЛ ЭмПРА (11 Вт)	Imax=3* Iном=3*0.116=0.348 А
17	Светильник наружного освещения светодиодный LC STREET-55 (55 Вт)	Imax=2* Iном=2*0.268=0.536 А

Данные табл. 1 не подтверждают выводов, сделанные в [1], что в моменты включения и отключения новых видов источников света возникают токи, превышающие номинальный ток в десятки раз. Они находятся в следующих пределах:

ЛЛ: 3-4,75 $I_{ном}$;

КЛЛ: 3-7 $I_{ном}$;

СДЛ: 1-8 $I_{ном}$.

Выводы:

1. Исследование пусковых токов во время включения различных энергосберегающих ламп и ламп накаливания, применяемых в служебных и жилых зданиях показывает, что наибольшие пусковые токи создают СДЛ, в некоторых случаях пусковой ток достигает 8 $I_{ном}$.
2. В процессе отключения источников света не у одного исследуемого образца пиковые токи не зафиксированы.
3. С учетом вывода 1, и того, что доля осветительной нагрузки не превышает 50% от суммарной нагрузки зданий, и с учетом фактора разновременности включения осветительных приборов, пиковыми токами, создаваемыми осветительными приборами можно пренебречь.

Библиографический список

1. Центр Электромагнитной Безопасности. http://www.tesla.ru/
2. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, В.Д. Поляков, Т.К. Романова, И.П. Шестопалова, А.С. Шевченко, В.А. Хухтикова. –М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
3. Применение светильников нового поколения для наружного освещения предприятий / Г.Я. Вагин, А.И. Гардин, А.А. Асабин, А.С. Шевченко. –Промышленная энергетика, 2011, №4.

УДК 621.316

А.Б. ЛОСКУТОВ, Д.В. ЗЫРИН, А.А. ЛОСКУТОВ, А.И.АКИМОВА

РАЗРАБОТКА АВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ УНИВЕРСАЛЬНОГО ТРЕХЛУЧЕВОГО УЗЛА НАГРУЗКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Выполнен анализ состояний коммутационных аппаратов в универсальном трехлучевом узле нагрузки распределительной сети при аварийных режимах. Данный узел является основополагающим элементом гексагональной распределительной сети (ГРС). Сформированные состояния выключателей являются основой для управляющих сигналов от системы управления функционирования узла нагрузки.

***Ключевые слова*:** гексагональные сети, универсальный трехлучевой узел, алгоритм управления.

В настоящее время существующие распределительные сети 6-10 кВ большинства городских сетевых районов имеют магистрально-радиальную топологию. Она характеризуется рядом недостатков, таких как усугубление последствий каскадных аварий, недостаточная связанность между узлами сети. Такая конфигурация не удовлетворяет растущим требованиям надежности городских сетей.

Альтернативой существующим сетям, но не имеющей их недостатков, могут служить гексагональные сети напряжением 20 кВ (рис.1). Они представляют собой совокупность территориально равномерно распределенных узлов потребления электрической энергии, соединенных между собой линиями одинакового сечения, имеющих сотовую конфигурацию сети (в виде правильных шестиугольников).

Основу сети составляют универсальные узлы нагрузки. Каждый из них имеет три луча, один из которых – питающий нагрузку (питающий), второй – осуществляющий транзит мощности (транзитный), третий – находящийся в горячем резерве (резервный). При необходимости возможна переконфигурация узла и изменение потоков мощности в сети.

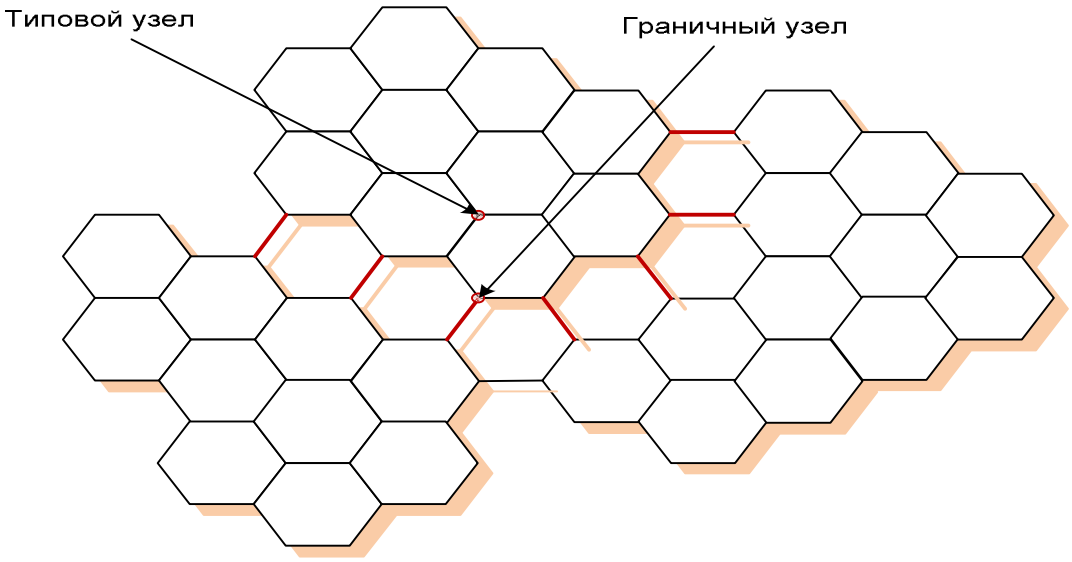


Рис. 1. Гексагональная распределительная сеть 20 кВ и узлы нагрузки

Универсальный узел состоит из элементов энергосетей, включающих генераторы, средства и сети их подключения, магистральные и распределительные сети, потребителей совместно с компьютерной информационной сетью, охватывающей энергосеть и осуществляющей автоматическое управление устройствами энергосети. Из-за деления гексагональной сети на зоны, работающие изолировано, но имеющие связи в горячем резерве (рис.1), можно выделить два основных вида узла нагрузки: граничный (имеющий резервную линию) и типовой (находящийся внутри зоны). Схема на рис.2 является примером такого универсального узла нагрузки

в распределительной гексагональной сети 20 кВ. Она представляет собой две системы шин, одна из которых является рабочей, а вторая – резервной. Соответствующие рабочие Q1.2, Q2.2, Q3.2 и резервные Q1.1, Q2.1, Q3.1 выключатели, которые необходимы для инвариантных переключений состояния узла, профилактических и ремонтных работ.

Типовой узел нагрузки может иметь некоторое число конфигураций, например, линия 1 (Л1) – питающая (П), линия 2 (Л2) и линия 3 (Л3) – транзитные (Т) (рис.3,а); Л1 – Т, Л2 – П, Л3 – Т (рис.3,б) и т.д. Соответственно и граничный узел нагрузки имеет определенное количество состояний, например, Л1 – П, Л2 – Т, Л3 – резервная (Р) (рис.3,в); Л1 – Т, Л2 – Р, Л3 – П (рис.3,г) и т.д.

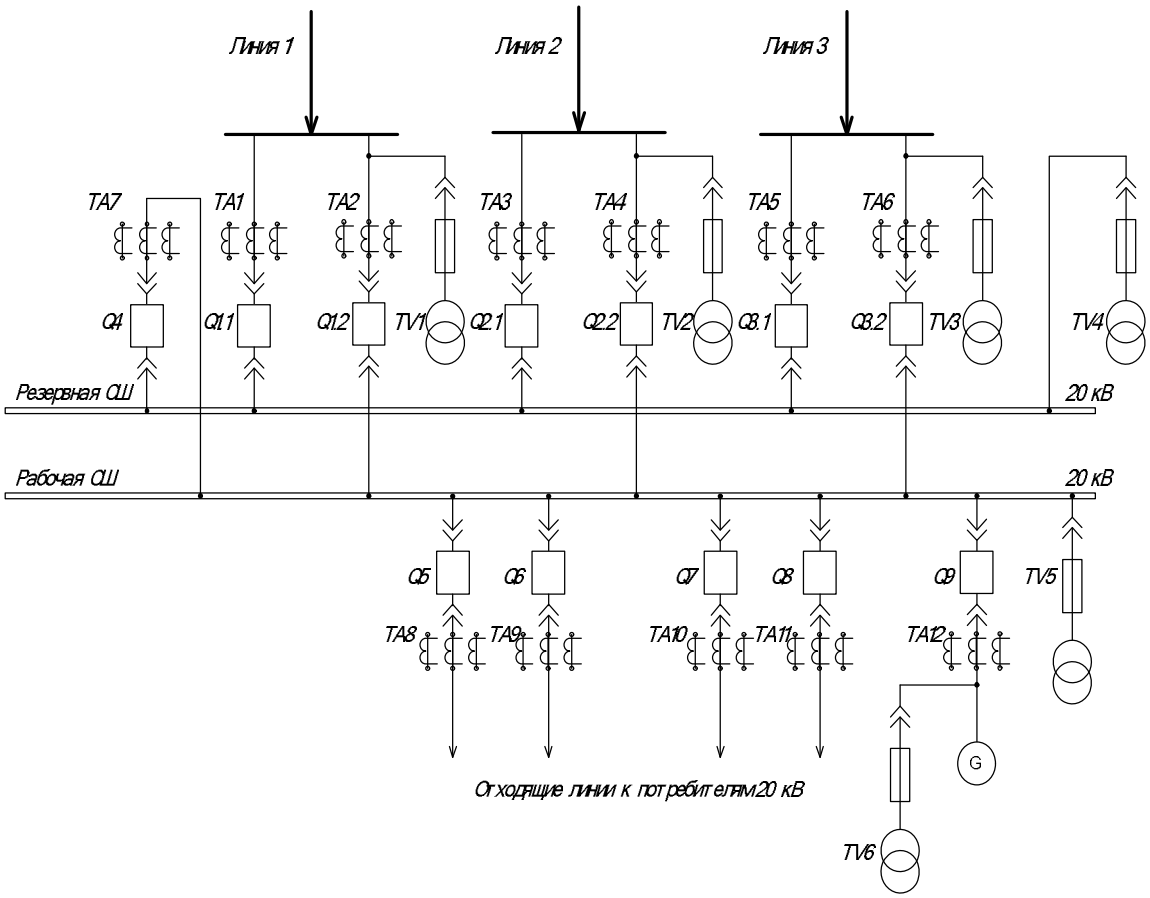


Рис. 2. Схема универсального узла нагрузки в гексагональной распределительной сети 20 кВ

Варианты переключений состояний данного узла конечны, поэтому возможна алгоритмизация схемы. Алгоритмы управления узлом закладываются в работу управляющего модуля ИМУ – интегрированного модуля управления.

Он позволяет реализовывать автоматические функции управления, защиты, хранения и передачи информации. Изменение режима узла осуществляется сменой состояния выключателей. ИМУ оценивает ситуацию в сети, выбирает оптимальный из возможных режимов и подает сигналы на включение или отключение выключателей.

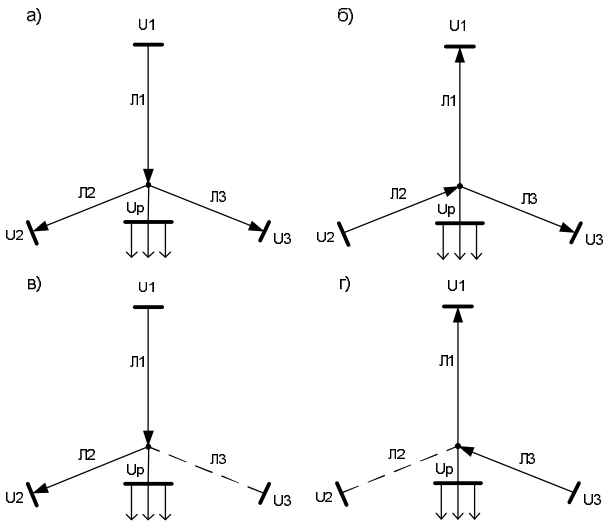


Рис. 3. Варианты состояния узла нагрузки гексагональной сети 20 кВ:
а, б – типового узла; в,г – граничного узла

Алгоритмы управления для ИМУ задаются логическими уравнениями, которые формируются на основе состояний выключателей (включен или отключен) распределительной подстанции гексагональной сети. Каждому аварийному режиму в зависимости от места возникновения аварии соответствуют определенные положения выключателей. Рассмотрим состояние типового узла при возникновении КЗ в различных элементах узла гексагональной распределительной сети для конфигурации линия 1 (Л1) – питающая (П), линия 2 (Л2) и линия 3 (Л3) – транзитные (Т).

КЗ в линиях при данном состоянии узла рассмотрены в таблице 1 при отключенной и подключенной резервной системе шин (СШ).

Таблица 1

Состояния выключателей при КЗ в линиях для типового узла

Q1.1	Q1.2	O2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Состояние резервной СШ	КЗ в ли-нии
0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	отключена	Л1
0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1		Л2
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1		Л3
0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	включена	Л1
1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1		Л2
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1		Л3

При возникновении КЗ в линии 1 при отключенной резервной СШ выключатели Q1.1, Q1.2, Q2.1, Q3.1, Q4 отключены, остальные остаются во включенном состоянии. При подключенной резервной СШ отключены выключатели Q1.1, Q1.2, Q2.2, Q3.2.

Состояние выключателей при коротком замыкании со стороны распределенной генерации приведены в таблице 2.

Таблица 2

Состояния выключателей при КЗ со стороны распределенной генерации для типового узла

Q1.1	Q1.2	O2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Состояние резервной СШ
0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	отключена
0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	
0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	
1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	включена
1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	
1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	

КЗ со стороны потребителей 20 кВ вызывает срабатывание соответствующего выключателя и отключение линии, отходящей к этим потребителям. В таблице 3 приведены состояния выключателей при КЗ со стороны потребителей для типового узла.

Таблица 3

Состояния выключателей при КЗ со стороны потребителей 20 кВ для типового узла

Q1.1	Q1.2	O2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Состояние резервной СШ	КЗ со стороны потре-бителей
0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	отключена	Q5
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1		Q6
0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1		Q7
0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1		Q8
1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	включена	Q5
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1		Q6
1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1		Q7
1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1		Q8

Рассмотрим состояние граничного узла при возникновении КЗ в различных элементах узла гексагональной распределительной сети для конфигурации Л1 – П, Л2 – Т, Л3 –Р.

Короткие замыкания в линиях рассмотрены в таблице 4 и таблице 2 при отключенной и подключенной резервной системе шин.

Таблица 4

Состояния выключателей при КЗ в линиях для граничного узла

Q1.1	Q1.2	O2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Состояние резервной СШ	КЗ в линии
0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	отключена	Л1
0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1		Л2
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1		Л3
0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	включена	Л1
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1		Л2
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1		Л3

Так например, при возникновении КЗ в линии 1 при отключенной резервной СШ выключатели Q1.1, Q1.2, Q2.1, Q3.1, Q4 отключены, остальные остаются во включенном состоянии, причем выключатель Q3.2 переходит в состояние «включено» для сохранения питания узла и резервная линия становится питающей. При подключенной резервной СШ отключены выключатели Q1.1, Q1.2, Q2.2, Q3.2 и аналогично предыдущему случаю включается Q3.1 для питания узла.

При КЗ со стороны распределенной генерации отключается соответствующий выключатель Q9, отделяя поврежденный участок от сети. Положения выключателей в узле при данном КЗ приведены в таблице 5.

Таблица 5

Состояния выключателей при КЗ со стороны распределенной генерации для граничного узла

Q1.1	Q1.2	O2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Состояние резервной СШ
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	отключена
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	включена
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	

В таблице 6 приведены состояния выключателей при КЗ со стороны потребителей для граничного узла.

Таблица 6

Состояния выключателей при КЗ со стороны потребителей 20 кВ для граничного узла

Q1.1	Q1.2	O2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Состояние резервной СШ	КЗ со стороны потребителей
0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	отключена	Q5
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1		Q6
0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1		Q7
0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1		Q8
1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	включена	Q5
1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1		Q6
1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1		Q7
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1		Q8

Гексагональные распределительные сети благодаря своей конфигурации, в основе которой лежит трехлучевой узел, имеют многократное резервирование пути протекания тока от питающего узла к потребителю. Также «выпадение» (погашение подстанции) одного из узлов сети при какой-либо аварийной ситуации, данный неработоспособный участок сети изолируется с сохранением целостного функционирования сети.

Рассмотренные состояния выключателей позволяют сформировать типовые состояния узла нагрузки необходимые для создания алгоритма работы управляющего модуля. Унификация узлов гексагональной распределительной сети дает возможность применить рассмотренные и проанализированные один раз режимы работы универсального узла нагрузки для остальных узлов сети. Реализация алгоритмов управления узлом возможна только в программном комплексе оптимальном для работы гексагональных распределительных сетей.

Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ [Текст] // Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. / Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 11-17.

2. **Лоскутов, А.Б.** Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией [Текст] // Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. / Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 3-7.

3. **Пат. №118133 Российская Федерация**, МПК7 H02J 3/00 (2006 01). Система передачи электрической энергии [Текст] / Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А.: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева”. – № 2011154247; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 3 с.: ил.

4. **Лоскутов, А.Б.** Гексагональные сети – сети с автоматическим управлением и распределением электроэнергии [Текст] // Лоскутов А.Б., Зырин Д.В., Лоскутов А.А. /Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды НГТУ. – Н. Новгород: НГТУ. – 2013.

5. **Лоскутов, А.Б.** Особенности автоматического функционирования узловых подстанций гексагональных электрических распределительных сетей 20 кВ [Текст] // Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. / Федоровские чтения 2014.XLIV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи (Москва 12-14 ноября 2014 года). Сборник материалов и докладов. – 2014. – С. 19-24.

УДК 621.316

А.Б. ЛОСКУТОВ, А.А. ЛОСКУТОВ, Д.В. ЗЫРИН, А.С.ДЕМИДОВА

ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены программные комплексы автоматизированных систем управления распределительными электрическими сетями ведущих мировых производителей электроэнергетической отрасли. Описана необходимость перехода к автоматическому управлению распре-

делительными электрическими сетями путем внедрения гексагональных сетей. Гексагональные сети позволяют осуществлять автоматическое изменение топологии сети благодаря своей конфигурации. Возможность автоматического функционирования гексагональных сетей задает высокие требования к программным комплексам, обеспечивающим их функционирование.

***Ключевые слова*:** автоматическое управление, автоматизированное управление, гексагональные сети, распределительные сети

В настоящее время в России наблюдается растущий интерес к интенсивно развивающемуся в последнее десятилетие во всем мире направлению модернизации электрических сетей, получившему название Smart Grid. В её основу заложены такие ключевые ценности, как надежность, экономичность, органичность взаимодействия с окружающей средой и безопасность. Для некоторых стран технология Smart Grid является технологией будущего, которая позволит значительно повысить уровень надежности, безопасности и эффективности энергетических систем, для других – работа на пути к «интеллектуальному городу» уже идет полным ходом.

В связи с этим появляется необходимость в появлении системы управлении, которая полностью будет отвечать требованиям концепции Smart Grid. На сегодняшний день уже недостаточно только контролировать и управлять. Работу сети необходимо оптимизировать, полученные данные анализировать, также необходимо снизить потери электрической энергии, повысить ее безопасность и качество.

В мире существует программные продукты, которые удовлетворяют данным требованиям. Их разрабатывают такие крупные компании, как Schneider Electric, Siemens, ABB, Alstom и т.д.

Schneider Electric ADMS (Advanced Distribution Management System) является инновационной системой, которая объединила в себе все современные средства: подсистему управления распределительной сетью (DMS), подсистему диспетчерского управления и сбора данных (SCADA), подсистему управления аварийными отключениями (OMS) и геоинформационную систему (GIS). Все эти подсистемы реализованы на базе единой надежной платформы с единым пользовательским интерфейсом. Отличительными чертами данной системы являются самовосстанавливающиеся характеристики, распределённая генерация энергии, децентрализация управления, метеорологические данные в режиме реального времени

Департамент производства и распределения электроэнергии компании Siemens разработала систему SICAM PAS. Модульная структура аппаратуры и программного обеспечения SICAM PAS обеспечивают высокую степень адаптируемости системы к специфике конкретных предприятий. Другим немаловажным достоинством SICAM PAS является бесшовная интеграция с любыми системами управления на базе техники SIMATIC. Это дает возможность объединения автоматизированной системы (АСУ) ТП и систем диспетчерского уровня управления и устранения, избыточных взаимодублирующих элементов.

Станция является полностью необслуживаемой за счет отсутствия изнашивающихся и вращающихся элементов. Программное ядро реализует функции конфигурирования, отладки и диагностики системы, сбора данных и преобразования протоколов.

Компания Alstom Grid разработала, новую серию интеллектуальных электронных устройств P60 Agile. Это универсальное решение для полной защиты, контроля, учета и измерения электроэнергетических систем. Главное преимущество серии P60 Agile состоит в том, что она представляет собой компактное устройство широкого назначения, выполненное в одном корпусе.
Серия P60 Agile включает в себя такие интеллектуальные электронные устройства, как ненаправленные токовые защиты фидера, направленные токовые защиты фидера от замыканий на землю и защиты по напряжению.

Таблица 1

Сравнительная таблица по функциям автоматизированных систем управления различных фирм производителей.

Функции	Schneider	Siemens	ABB	Alstom
1. Расчет и анализ параметров сети	+	+	+	+
2. Прогноз и моделирование режимов сети	+	+	+	+
3. Определение места повреждения цепи	+	-	+	-
4. Автоматическое восстановление электроснабжения при аварийных отключениях	+	-	+	-
5. Хронологическая запись режимов работы основного оборудования	+	+	+	+
6. Анализ топологии сети	+	+	+	+
7. Передача информации на верхние уровни управления	-	+	+	-
8. Расчёт потокораспределения	+	+	+	-
9. Распределённая генерация энергии	+	-	+	+
10. Географическая привязка местности	+	-	+	+
11. Интеграция метеосистем в реальном времени	+	-	-	-
12. Средства создания отчётов	-	+	+	-
13. Самодиагностика	+	+	+	+

Решения компании ABB в области систем связи и управления сетями позволяют контролировать, управлять и защищать энергосистемы. MicroSCADA Pro DMS 600 выполняет управление коммутациями и электрическим режимом сети в реальном масштабе времени с помощью графического пользовательского

интерфейса, позволяет выполнять моделирование сети. Программный пакет может работать как в локальной вычислительной сети по технологии клиент-сервер с резервированием, так и на одной рабочей станции. Графическая система представления данных распределительных сетей использует реляционные базы данных и географические карты. Включены также функции планирования и оптимизации режимов. Система содержит функции планирования коммутаций, управления оперативно-выездными бригадами, а также гибкую систему для составления отчетов.

Сравнительный анализ по основному функционалу и реальному применению автоматизированных систем управления приведен в таблицах 1 и 2.

Таблица 2

Сравнительная таблица автоматизированных систем управления различных фирм производителей

Параметры сравнения	Schneider Electric	Siemens	ABB	Alstom
1.Программное обеспечение	Windows 2003 или 2008 Server	Windows XP Embedded	Windows XP, Opera	Windows XP
2.Класс напряжения	0,4-110 кВ	110-220 кВ	0,4-110 кВ	6-35 кВ
3.Реализованные проекты	«Белгородэнерго», Elektro Celje, Словения	Жигулёвская ГЭС	DynaPeaQ Англия	-
4.Протоколы	МЭК 60870-5-104	МЭК 60870-5-104	IEC 60870-5-101, 104,IEC 61850, МЭК 61850	МЭК 61850

Настоящие электрические сети имеют сложную структуру, вследствие чего перестают справляться с высокими нагрузками при передаче и распределении электроэнергии. Возникает вопрос о формализации таких сетей, которые будут удовлетворять современным требованиям гибкости и интеллектуализации, следовательно, и создании для них автоматизированных систем управления. Исправить сложившуюся ситуацию можно изменением подхода к построению распределительных электрических сетей – переходу к гексагональным сетям.

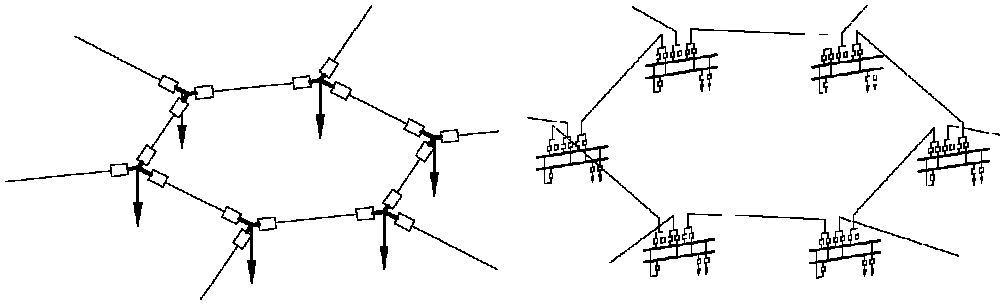


Рис. 1. Ячейка гексагональной сети с распределительным устройством в узлах нагрузки

Гексагональная сеть представляет собой совокупность равномерно-распределенных узлов потребления электрической энергии, соединенных между собой линиями одинакового сечения, имеющая топологию в виде правильных шестиугольников. Гексагональные сети имеют четкую системную конфигурацию, в которой все кабельные линии между распределительными пунктами (РП) находятся в работе, а сами РП питаются по трём линиям (рис.1). Все узлы данной сети однотипны и универсальны, соответственно алгоритмы их управления тоже универсальны.

Для прототипа узла нагрузки гексагональной сети – подстанции с цифровым управлением – компанией «Теком» и НГТУ был разработан программный комплекс распределенной системы мониторинга и управления (РСМУ). Основными функциями РСМУ являются: периодический автоматический сбор привязанных к единому календарному времени измеренных данных с заданной дискретностью учета; обработка и хранение полученной информации; выдача данных в соответствии с требованиями пользователей и внешних систем управления; технический учет электроэнергии.

При разработке гексагональной сети встает вопрос о выборе оптимальной автоматизированной системы управления. Данная система должна обеспечивать надежность распределительной сети, автоматически управлять элементами сети и в кратчайшие сроки устранять повреждения. Сегодня, к сожалению, все существующие системы управления распределительными сетями закрыты для пользователей, нет возможности предварительного просмотра и анализа функционирования, работы проектируемой сети на имитационных моделях. Все системы изготавливаются «под ключ». Кроме того, они имеют высокие цены, за счёт сложности конфигурации сетей. Однако, созданная в НГТУ РСМУ является наиболее оптимальной для гексагональных сетей за счет простоты, открытости, доступности на российском рынке и прозрачности цен на программный продукт.

Необходима совместная и открытая работа между разработчиками АСУ и проектировщиками. Создание универсальной системы алгоритмов для различных состояний обеспечит необходимое функционирование электрической сети и получит массовое применение. Такая система управления гексагональных сетей способствует выведению энергетики на новый уровень, соответствующий современным мировым стандартам и запросам потребителей.

Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ [Текст] // Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. / Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 11-17.
2. **Лоскутов, А.Б.** Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией [Текст] // Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. / Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 3-7.

3. **Пат. №118133 Российская Федерация**, МПК7 H02J 3/00 (2006 01). Система передачи электрической энергии [Текст] / Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А.: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева”. – № 2011154247; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 3 с.: ил.
4. **Лоскутов, А.Б.** Гексагональные сети – сети с автоматическим управлением и распределением электроэнергии [Текст] // Лоскутов А.Б., Зырин Д.В., Лоскутов А.А. /Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды НГТУ. – Н. Новгород: НГТУ. – 2013.

УДК 621.31

Г.Я. ВАГИН, Е.Б. СОЛНЦЕВ, А.С. ШЕВЧЕНКО, О.Ю.МАЛАФЕЕВ

МЕТОДИКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАНЖИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ "СОВОКУПНОЙ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ"

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведена методика экономического ранжирования осветительных приборов в зависимости от времени работы освещения в год. Выявлены наиболее экономически эффективные источники внутреннего освещения государственных учреждений.

***Ключевые слова*:** ранжирование, электрическое освещение, совокупная стоимость владения, экономическая эффективность.

С появлением новых устройств возникает проблема их эффективного использования. Существующий европейский подход [1] базируется на определении наилучшего товара с точки зрения нескольких критериев: энергоэффективности, экологичности, качества и безопасности для здоровья человека. Однако такой подход не учитывает экономическую эффективность использования устройства и, соответственно, приводит к неоправданным затратам. Разумеется, для потребителя не так важна энергетическая эффективность, сколько экономическая.

Одним из важных экономических показателей функционирования любого устройства является совокупная стоимость владения. Стоимость владения определяет полные затраты на эксплуатацию изделия в течение определенного срока.

Различают технический и экономический срок службы устройства (технологии). Технический срок – это время, в течение которого реализуемое оборудование или материалы изнашиваются физически. Экономический срок – это время, в течение которого реализуемое оборудование или проект дает прибыль,

предусмотренную в инвестиционном предложении, или время, после которого оборудование морально устаревает.

В качестве расчетного промежутка для определения величины стоимости владения была выбрана величина экономического срока эксплуатации оборудования. Для источников света этот срок равен 15 лет [2].

Стоимость владения на интервале равном экономическому сроку службы осветительного прибора (о. п.) определяется по выражению:

$$C_{вл} = C_{о.п.} + C_{экс} + C_{ээ} \quad (1)$$

где $C_{о.п.}$ - стоимость осветительного прибора (о.п.), руб.; $C_{экс}$ - стоимость эксплуатации о.п. за весь экономический срок службы (затраты на замену ламп, вышедших из строя), руб.; $C_{ээ}$ – стоимость потребленной электроэнергии, руб.

Стоимость эксплуатации осветительного прибора:

$$C_{экс} = C_{л} \cdot \frac{T_{г}}{T_{сл}} \cdot 15 \quad (2)$$

где $C_{л}$ – стоимость лампы, руб.; $T_{г}$ – время работы системы освещения в год, ч; $T_{сл}$ – нормативный срок службы лампы, ч; 15 – экономический срок службы - промежуток времени, для которого определяются эксплуатационные затраты, лет.

При расчетах $C_{экс}$ необходимо использовать целую часть отношения $\frac{T_{г}}{T_{сл}} \cdot 15$ (без округления).

Стоимость потребленной электроэнергии рассчитывается по выражению:

$$C_{ээ} = Ц_{ээ} \cdot W_{ээ} = Ц_{ээ} \cdot P_{о.п.} \cdot T_{г} \cdot 15 \quad (3)$$

где $Ц_{ээ}$ – стоимость электроэнергии, руб./Вт·ч; $W_{ээ}$ – объем электроэнергии, потребленной о.п. за экономический срок службы, Вт·ч; $P_{о.п.}$ – мощность о.п., Вт.

Таким образом:

$$C_{вл} = C_{о.п.} + N_{л} \cdot C_{л} \cdot \frac{T_{г}}{T_{сл}} \cdot 15 + Ц_{ээ} \cdot P_{о.п.} \cdot T_{г} \cdot 15 \quad (4)$$

Для того чтобы привести светильники с различными лампами и со схожими световыми характеристиками к одинаковым условиям, определим удельную стоимость владения, разделив выражение (4) на световой поток о.п. $Ф_{о.п.}$

$$\frac{C_{вл}}{Ф_{о.п.}} = \frac{C_{о.п.}}{Ф_{о.п.}} + \frac{N_{л} \cdot C_{л}}{Ф_{о.п.}} \cdot \frac{T_{г}}{T_{сл}} \cdot 15 + Ц_{ээ} \cdot \frac{P_{о.п.}}{Ф_{о.п.}} \cdot T_{г} \cdot 15 \quad (5)$$

Т.к. отношение $\frac{C_{о.п.}}{Ф_{л}}$ представляет собой удельную стоимость $K_{л}$, а отношение $\frac{P_{л}}{Ф_{л}}$ обратно пропорционально световой отдачи $K_{со}$, то выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$C_{уд.вл} = C_{уд.оп} + C_{уд.л} \cdot \frac{T_{г}}{T_{сл}} \cdot 15 + \frac{Ц_{ээ} \cdot T_{г} \cdot 15}{K_{со.оп}} \quad (6)$$

Для анализа были выбраны следующие осветительные приборы:

1. Светильники с лампами накаливания (ЛН);
2. Светильники с галогенными лампами (ГЛН);
3. Светильники с компактными люминесцентными лампами (КЛЛ);
4. Светильники с люминесцентными лампами типа Т8 с галофосфатным люминофором и с электромагнитным ПРА (ЛЛ Т8 ЭмПРА);

5. Светильники с люминесцентными лампами типа Т8 с трех полосным люминофором и с электронным ПРА (ЛЛ Т8 ЭПРА);
6. Светильники с люминесцентными лампами типа Т5;
7. Светильники с ретрофитными светодиодными лампами ($СД_{рет}$) (лампы прямой замены ЛН);
8. Светодиодные светильники для прямой замены светильников с линейными ЛЛ ($СД_{лин}$).

Все осветительные приборы можно разделить на 2 группы:
- лампы прямой замены ламп накаливания – ретрофитные о. п. (ЛН, ГЛН, КЛЛ, $СД_{рет}$),
- светильники с линейными люминесцентными лампами, и их светодиодные аналоги – линейные о.п. (офисные светильники с ЛЛ всех типов, а также $СД_{лин}$).

Для определения удельных показателей был проведен анализ характеристик о.п. различных производителей. Для ретрофитных о.п. в качестве эталона были выбраны ЛН мощностью 60 Вт, для линейных - офисные люминесцентные светильники размером 595х595 мм.

Согласно [3], а также проведенному анализу характеристик как отечественных, так и зарубежных о.п., были полученны средние значения удельных показателей, а также срок службы ламп. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Удельные показатели ретрофитных о.п.

Осветительный прибор	Светоотдача, $K_{со.оп}$, лм/Вт	Удельная стоимость, $C_{уд.оп}$, руб./лм	Срок службы, $T_{сл}$, ч
ЛН	12	0,02	1000
ГЛН	15	0,14	2000
КЛЛ	56	0,28	8000
$СД_{рет}$	79	0,58	25000

Примечание. Для данных о.п. $C_{уд.оп}$ и $C_{уд.л}$ равны.

Таблица 2

Удельные показатели линейных офисных о.п.

Осветительный прибор	Лампа		Светильник		Срок служб, $T_{сл}$, ч
	Светоотдача $K_{со.л}$, лм/Вт	Удельная стоимость, $C_{уд.л}$, руб./лм	Светоотдача, $K_{со.оп}$, лм/Вт	Удельная стоимость, $C_{уд.оп}$, руб./лм	
ЛЛ Т8 ЭмПРА	62	0,04	36	0,19	8000
ЛЛ Т8 ЭПРА	73	0,06	47	0,22	12000
ЛЛ Т5	88	0,16	56	0,80	16000
$СД_{лин}$	-	-	93	0,74	25000

Примечание. $СД_{лин}$ представляет собой неразборный светильник. В расчете (6) $C_{уд.л}$ принимается равной $C_{уд.оп}$

Подставив в выражение (6) значения из таблицы 1 и 2, а также изменяя время работы системы освещения в год, была получена зависимость удельной

стоимости владения о.п. от времени работы системы освещения за 15 лет (рис.1). Стоимость электроэнергии принята равной 4 руб./кВт·ч.

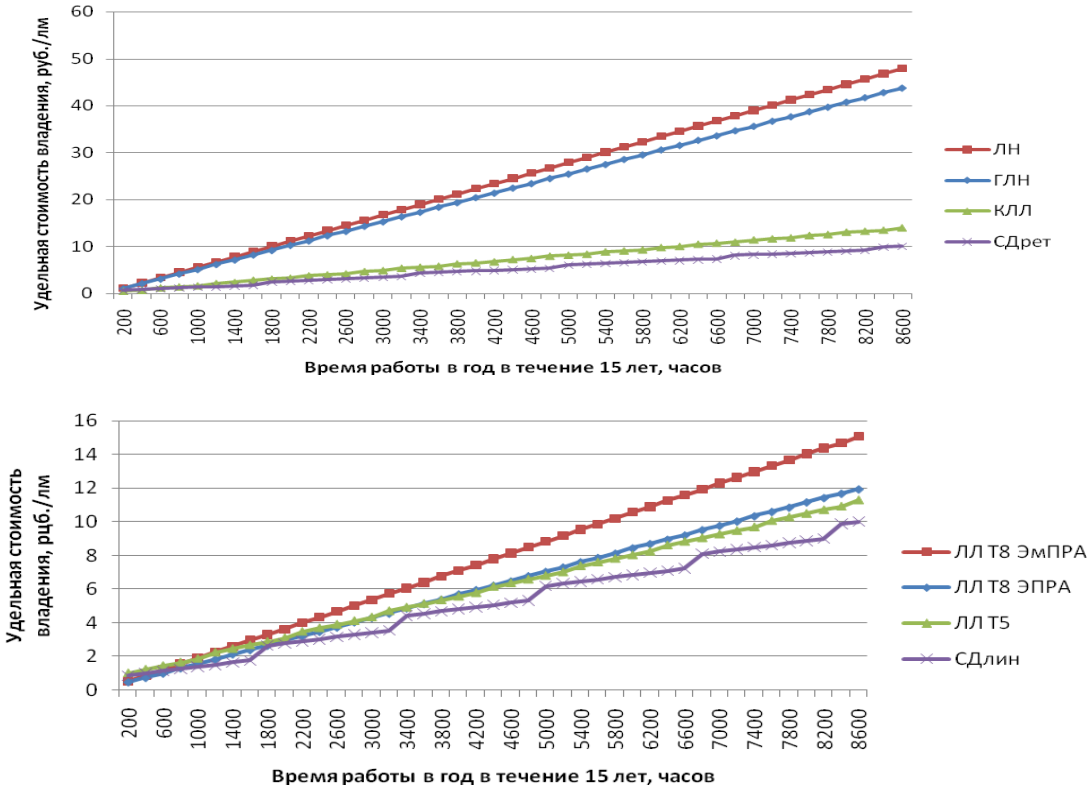


Рис. 1. Удельная стоимость владения осветительных приборов:
а) ретрофитных б) линейных офисных

Рассмотрим детально получившиеся зависимости на различных интервалах времени.

Интервал времени работы системы освещения от 200 до 1200 часов в год.

а) б)

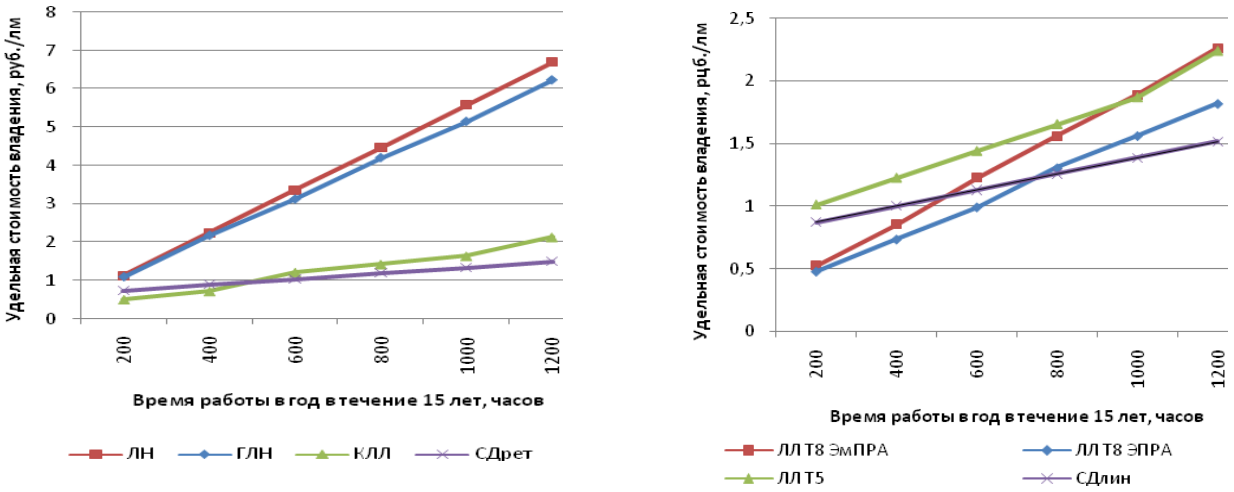
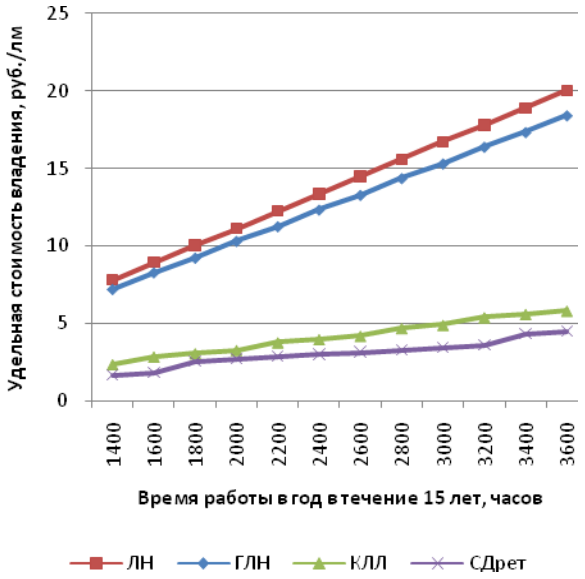


Рис. 2. Удельная стоимость владения на интервале времени работы системы освещения от 200 до 1000 часов в год:
а) ретрофитных б) линейных офисных

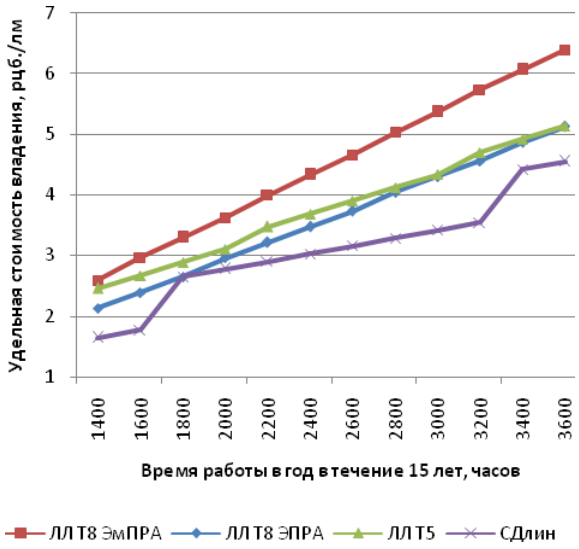
Среди ретрофитных о.п. (рис.2а), при работе освещения в помещении менее 500 часов в год, наиболее экономически эффективными являются КЛЛ. Начиная от 600 часов, на первое место выходят $СД_{рет}$. ЛН и ГЛН уже начиная с 200 часов не способны конкурировать с лампами других типов.

Среди линейных источников света на данном промежутке времени работы (рис. 2б) светильники с лампами ЛЛ Т5 наименее эффективные. На первом месте по эффективности находятся о.п. с ЛЛ типа Т8 с ЭПРА. Однако при работе системы освещения более 800 часов светодиодные светильники $СД_{лин}$ являются более эффективными.

Интервал времени работы системы освещения от 1400 до 3600 часов в год.



а)



б)

Рис. 3. Удельная стоимость владения на интервале времени работы системы освещения от 1000 до 3600 часов в год:
а) ретрофитных б) линейных офисных

Среди ретрофитных о.п. (рис. 3а) наиболее экономически эффективными являются $СД_{рет}$, КЛЛ незначительно уступают. Данное положение сохраняется и в дальнейшем (рис. 4а).

Что касается линейных источников света (рис. 3б), то на первом месте $СД_{лин}$. Характеристики ЛЛ типа Т8 с ЭПРА и ЛЛ типа Т5 практически совпадают.

Характеристика светодиодных светильников $СД_{лин}$ имеет ярко выраженный ломаный характер, что объясняется большими дополнительными затратами, связанными с заменой вышедших из строя о.п. за 15 летний период.

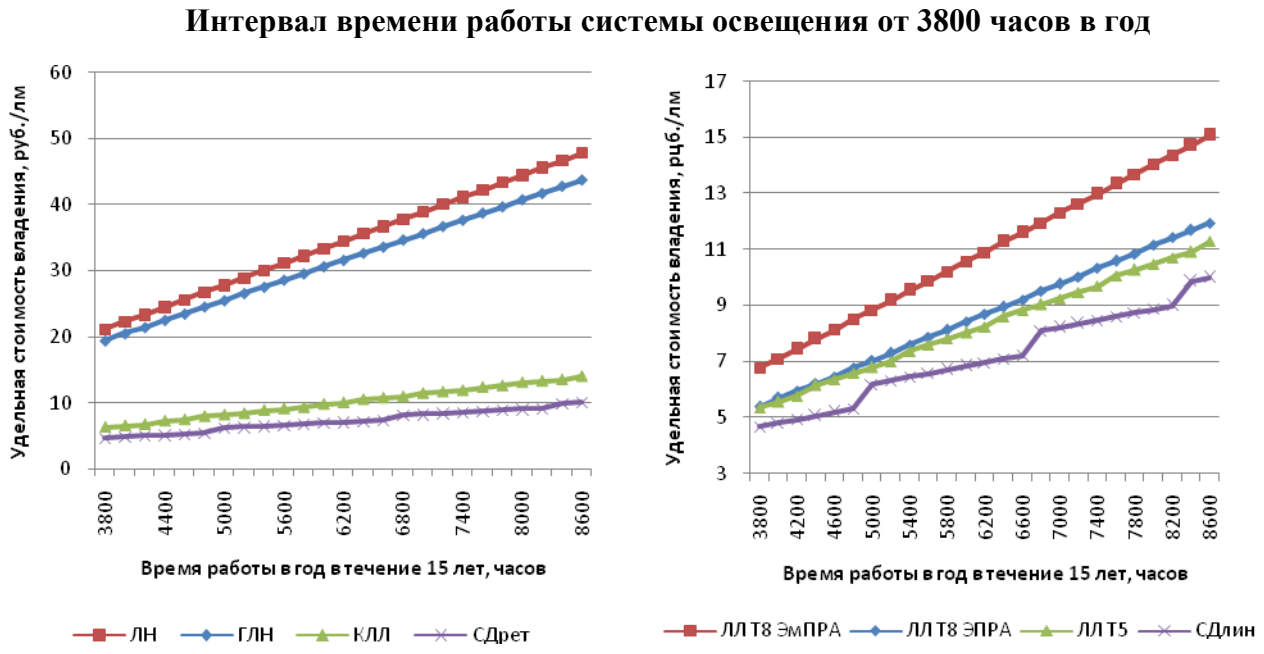


Рис. 4. Удельная стоимость владения на интервале времени работы системы освещения от 3600 часов в год
а) ретрофитных б) линейных офисных

На данном интервале происходит одно изменение: о.п. с ЛЛ типа Т5 становятся эффективней о.п. с ЛЛ типа Т8 ЭПРА (рис. 4б).

На основе изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Светильники с ЛН и ГЛН являются экономически неэффективными независимо от времени работы системы освещения.
2. Среди ретрофитных о.п., при работе системы освещения до 500 часов в год рекомендуется использовать лампы типа КЛЛ. При работе системы освещения более 500 часов в год рекомендуется использовать $СД_{рет}$ для прямой замены ламп накаливания.
3. Светильники с люминесцентными лампами типа Т8 с ЭмПРА являются экономически неэффективными независимо от времени работы системы освещения.
4. При работе системы освещения до 800 часов в год экономическая эффективность ЛЛ типа Т8 с ЭПРА превышает эффективность других о.п. Начиная с 800 часов светодиодные светильники $СД_{лин}$ являются более эффективными.

Аналогичный расчет был проведен при стоимости электроэнергии 2,0 руб./кВт·ч и 6,0 руб./кВт·ч. Для наглядности результатов, были построены графики удельной стоимости владения, выраженной в относительных единицах при различной стоимости электроэнергии (рис. 5).

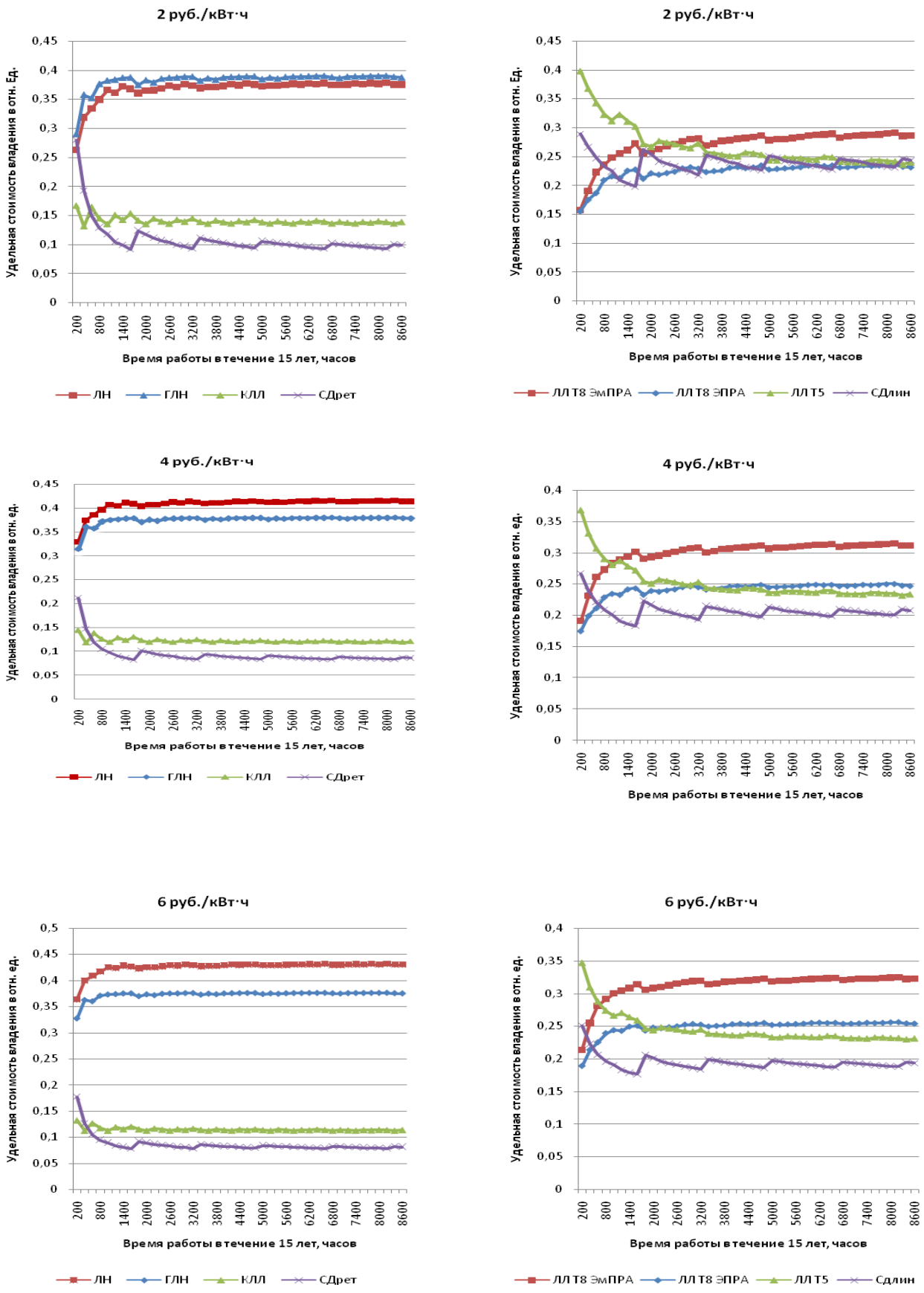


Рис. 5. Удельная стоимость владения в относительных единицах при различной стоимости электроэнергии

В результате, при стоимости 2,0 и 6,0 руб./кВт·ч для ретрофитных о.п. выводы аналогичны выводам при стоимости 4,0 руб./кВт·ч; для линейных – при стоимости 2 руб./кВт·ч светодиоды теряют свою позицию в пользу светильников с ЛЛ типа Т8 с ЭПРА, а при стоимости 6 руб./кВт·ч выводы аналогичны выводам при стоимости 4 руб./кВт·ч.

В целом можно отметить, что уже при нынешних ценах светодиодные осветительные приборы способны успешно конкурировать с другими источниками света.

Библиографический список

1. www.topten.eu
2. Энергосбережение в бюджетной сфере. Учебное пособие для энергоменеджеров / Н. Новгород, 2014.
3. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Памфилов, В.Д. Поляков и др.; под ред. Л.П. Варфоломеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 288 с.: ил.

УДК 621.31

Г.Я.ВАГИН, А.М.МАМОНОВ, А.А. СЕВОСТЬЯНОВ, Е.Б. СОЛНЦЕВ, П.В. ТЕРЕНТЬЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАРКИРОВКИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗДАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГОАУДИТА ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье описано разработанное учебно-справочное пособие «Использование маркировки инженерного оборудования зданий при разработке мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении энергоаудита объектов различного назначения» рассчитанное на специалистов с высшим техническим образованием, проходящим дополнительное обучение по программам повышения квалификации энергоаудиторов, а также пособие можно использовать для студентов старших курсов высших учебных заведений, как в качестве основного курса, так и в качестве факультативного.

***Ключевые слова*:** маркировка, энергоэффективность, стандарты.

Российская федерация существенно отстает от промышленно развитых стран в вопросах эффективности использования энергии. Одним из важных инструментов в решении проблемы повышения эффективности использования энергии является маркировка энергоэффективности зданий и их инженерного оборудования.

В соответствии с федеральным законом от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ большое количество предприятий должны проходить энергетические обследования - энергоаудит. Основной задачей при проведении энергоаудита является определение объектов с неэффективным использованием топливно-энергетических ресурсов и разработка мероприятий по повышению эффективности использования энергии. Использование инструмента маркировки энергетической эффективности инженерного оборудования позволит более качественно сформулировать мероприятия для повышения энергетической эффективности различных объектов.

Квалифицированных кадров для проведения энергетических обследований не хватает и в Российской Федерации организуется такое обучение во многих высших учебных заведениях. В этих условиях важным является подготовка учебного курса для обучения энергоаудиторов по использованию маркировки энергоэффективности при выработке мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении энергоаудита объектов различного назначения.

В связи с вышеизложенным, в настоящее время разработано учебно-справочное пособие по теме "Использование маркировки инженерного оборудования зданий при разработке мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении энергоаудита объектов различного назначения". Данное пособие позволит энергоаудиторам в выработке рекомендаций по повышению энергетической эффективности обследуемых объектов с использованием инструментов маркировки энергетической эффективности.

Задачами при подготовка учебно-справочного пособия являлись:

- формирование понятий о нормативно-правовой среде реализации программы по внедрению и применению стандартов и маркировки энергоэффективности;
- получение представления о методах повышения эффективности систем энергообеспечения зданий;
- формирование понятий о применении стандартов и маркировки энергоэффективности инженерного оборудования при проектировании и строительстве зданий высокой энергетической эффективности;
- использование маркировки инженерного оборудования зданий при разработке мероприятий по повышению энергетической эффективности при проведении энергоаудита объектов различного назначения.

В процессе подготовке пособия были изучены:

1. Международный и отечественный опыт использования инструмента маркировки энергетической эффективности при проведении энергетических обследований объектов различного назначения и разработки мероприятий по повышению энергетической эффективности.
2. Материалы ранее выполненных работ в рамках проекта Минобрнауки России, ПРООН/ГЭФ «Стандарты и маркировка для продвижения энергоэффективности в Российской Федерации».

3. Международная и отечественная нормативная и законодательная база в области маркировки энергоэффективности.
4. Проекты технических регламентов Таможенного союза об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности.
5. Барьеры в использовании маркировки энергетической эффективности в Российской Федерации.

В ходе выполнения работы был также проведен анализ имеющегося научного задела в области Стандартов и маркировки энергетической эффективности, систематизированы результаты, изложенные в научно-технических статьях и отчетах ведущих организации НП «АВОК», ООО «НПО ТЕРМЕК», ОАО «ЦНИИПРОМ зданий», МЭИ и ряда других, опубликованные в открытой печати.

Проведенный анализ показал, что к настоящему времени энергопотребляющее оборудование охвачено маркировкой энергоэффективности более чем в 50 странах мира. Из всего мирового сообщества наиболее значительных достижений в области энергетической эффективности достиг Европейский союз.
В 1992 году в ЕС была принята директива 92/75/ЕС, касающаяся маркировки и стандартной информации по потреблению энергии или других ресурсов бытовыми приборами. Все однородные бытовые электрический приборы делятся на 7 классов энергоэффективности (A, B, C,D,E,F,G). Наиболее энергоэффективным является класс A, а самым энергозатратным является класс G.

В 2010 году вышла новая директива 2010/31/ЕС по маркировке энергетической эффективности, которая расширяет сферу регулирования на промышленные и торговые приборы и оборудование. Введено 3 новых класса энергоэффективности A+, A++, A+++. Если продукция имеет высший класс энергоэффективности (A+++), то низшие классы (E-G) из этикетки для такой продукции исключаются.

В России работы по маркировке энергоэффективности оживились после принятия нового закона №261-Ф3 от 23.11.2009 года «Об энергосбережении и о повышении энергоэффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ». Постановлениями правительства РФ от 31.12.2009 и от 12.12.2011 №1708 и №1222 от 10.12.2010 №1009 утверждены перечни товаров в отношении которых устанавливаются требования энергоэффективности. установлено 10 классов энергоэффективности товаров – A+++, A++, A+, A, B,C,D,E,F,G. Приказом №224 от 17.05.2011г. Министерство регионального развития РФ утвердило «Требования энергетической эффективности зданий, строений, сооружений».

В настоящее время разработан и находится на межгосударственном согласовании проект технического регламента Таможенного союза «Об информировании потребителя об энергетической эффективности электрических энергопотребляющих устройств».

НП «АВОК» с привлечением ряда ведущих организаций по поручению Национального объединения строителей (НОСТРОЙ) разработало концепцию

нормативного обеспечения энергосбережения и повышения энергетической эффективности зданий и сооружений. В основу концепции положены принципы гармонизации отечественно нормативной базы с основными положениями европейской директивы 2010/31/ЕС (EPBD) – 2010 к её базовыми стандартами. Уже разработаны первые редакции четырех базовых стандартов, которые являются модификациями стандартов Евросоюза:

1. СП(EN15217:2007). Энергетическая оценка зданий. Методы выражения энергетических характеристик зданий и сертификация энергопотребления зданий.
2. СП(EN15603:2008). Энергетическая эффективность зданий – общее потребление энергии и определение энергетических характеристик.
3. СП (EN ISO 13790:2008). Энергетическая эффективность зданий. Расчет потребления тепловой энергии для отопления, охлаждения, вентиляции и горячего водоснабжения.
4. СП (EN 15316-2-1:2007). Системы энергопотребления зданий. Метод расчета энергетических характеристик и показателей энергоэффективности системы.

Больше внимания в Евросоюзе придают влиянию энергопотребляющей продукции на экологию. В 2005 году была принята Директива 2005/32/ЕС, в соответствии с которой все производители такой продукции обязаны предпринимать меры для уменьшения негативного влияния этой продукции на окружающую среду на всех стадиях ее жизненного цикла. Этот подход получил название «экодизайн». Экодизайн – одно из самых перспективных направлений на пути реализации политики энергоэффективности.

В связи с вступлением России в ВТО нам необходимо, как в Евросоюзе, разработать технические регламенты по экодизайну с тем, чтобы продукция могла выдерживать конкуренцию с продукцией других стран первые шаги в этом направлении уже сделаны.

В 2011 году НП «АПОК», ООО «НПО ТЕРМЕК» и ОАО «ЦЦНИИПромзданий» разработали первый базовый стандарт СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011. Зеленое строительство. Здания жилые общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания. В 2012 году был разработан стандарт СТО НОСТРОЙ 2.35.68-12-2012. Здания жилые и общественные. Учет региональных особенностей в рейтинговой системе оценки устойчивости среды обитания и национальный стандарт ГОСТ Р54.954-2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости.

При написании данного учебно-справочного пособия, авторы использовали подходы указанных выше нормативных документов Евросоюза и России.

Учебно-справочное пособие рассчитано на специалистов с высшим техническим образованием, проходящим дополнительное обучение по программам повышения квалификации энергоаудиторов, а также пособие можно использовать для студентов старших курсов высших учебных заведений, как в качестве основного курса, так и в качестве факультативного.

Библиографический список

1 **Наумов А.Л.** Маркировка энергоэффективности инженерного оборудования, как основной инструмент энергосбережения. - Энергосбережение, 2008, №3.
2 **Наумов А.Л.** Роль маркировки энергоэффективности оборудования в энергосбережении. - Журнал Российского химического общества им. Д.Н. Менделеева, 2008, т. LII №6.
3 **Наумов А.Л.** Энергоэффективность инженерного оборудования. - ЭСКО, 2013, №5.
4 **Башмаков И.А.**, Башмаков В.И. Повышение энергоэффективности в бюджетной сфере.- Энергосбережение , 2012, №5.
5 Методика проведения энергетических обследования (Энергоаудита) бюджетных учреждений. Р.Д. 34.01-03/Г.Я. Вагин, Л.В. Дудникова, Е.А. Зенютич и др. Нижний Новгород, НГТУ, НИФЭ, 2003.
6 **Вагин Г.Я.** К вопросу о повышении энергетическо эффективности промышленных предприятий. - Промышленная энергетика, 2013, №5.
7 Постановление Правительства РФ от 25.01.2011 №18 «Об утверждении правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов».
8 **Сеппанен О.** Требования к энергоэффективности в странах ЕС. - Энергосбережение, 2010, №7.

УДК 621.31

Г.Я.ВАГИН, Е.Н. СОСНИНА, Е.Б. СОЛНЦЕВ, А.А. СЕВОСТЬЯНОВ, А.М. МАМОНОВ, А.А. ПЕТРОВ

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТА СООРУЖЕНИЯ МИНИ-ТЭЦ ИЛИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье представлена методика, позволяющая сравнить несколько вариантов решения задачи выбора количества и мощности агрегатов мини-ТЭЦ или электростанции малой мощности.

***Ключевые слова*:** мини-ТЭЦ, электростанция малой мощности, структура капитальных и эксплуатационных затрат мини-ТЭЦ, сравнение вариантов.

Назначение и область применения мини-ТЭЦ или электростанций малой мощности весьма разнообразны [1], [2]. Задача выбора количества и мощности основного оборудования станции, устанавливаемой в системе электроснабжения, обычно имеет несколько вариантов решения, различающихся как количеством и мощностью выбранных агрегатов, так и их производителями. Для вы-

бора оптимального варианта необходимо учесть значительное количество различных факторов, в той или иной мере влияющих на состав оборудования.

Наиболее полно учесть возможные факторы при выборе определенного варианта решения задачи можно, выполнив технико-экономическое сравнение различных вариантов выбора оборудования станции. В соответствии с методикой [3], проект признается эффективным, если он имеет неотрицательный чистый дисконтированный доход (ЧДД) [2], [4]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=0}^{T} \frac{\phi_i}{(1+r)^i}, \tag{1}$$

где φ_i – чистый денежный приток на i-м шаге (году); T – горизонт расчета [5]; r – реальная процентная ставка [4]:

$$r = \frac{E_{\text{ном}} - b}{1+b},$$

где $E_{\text{ном}}$ – номинальная ставка дисконта; b – годовой уровень инфляции.
Чистый денежный приток на i-м шаге можно представить как:

$$\varphi_i = \Pi_i - З_i - K_i, \tag{2}$$

где Π_i и $З_i$ – поступления (выгоды) по проекту и расходы (затраты) на его эксплуатацию и возможный ущерб от перерыва электроснабжения; K_i – годовые капитальные вложения в проект.
Подставляя (2) в (1), получим:

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=0}^{T} \frac{\Pi_i - З_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=0}^{T} \frac{K_i}{(1+r)^i}. \tag{3}$$

Структура капиталовложений K_i одного из возможных вариантов выбора оборудования станции на i-м шаге его жизни представлена в таблице 1.

Годовые эксплуатационные затраты $З_i$ можно разделить на зависящие и не зависящие от объема вырабатываемой станцией энергии. Кроме этого, в структуру годовых эксплуатационных затрат имеет смысл включить величину ожидаемого годового ущерба, связанного с возможным отказом оборудования станции, поскольку данная величина зависит от принятого варианта решения задачи по выбору оборудования станции. Включение ущерба в структуру годовых эксплуатационных затрат позволит оценить эффективность применения мини-ТЭЦ или электростанции малой мощности, используемой в качестве резервного источника питания [2] на промышленных предприятиях.

Таблица 1

Капитальные затраты K_i на реализацию проекта на *i*-м шаге его жизни [5]

Статьи затрат	Сумма затрат, тыс. руб
Проектные работы	
Затраты на строительство здания	
Прокладка кабельных сетей	
Монтаж электросилового оборудования, включая системы учета	
Комплектация системы освещения	
Комплектация электросилового оборудования	
Комплектация оборудования вентиляции и отопления	
Стоимость силовых агрегатов	
Монтаж силовых агрегатов	
Комплектация оборудования тепломеханической части	
Монтаж оборудования тепломеханической и газовой части	
Пуско-наладочные работы	
Комплектация КИП, автоматики, пожарной и охранной сигнализации	
Монтаж внешнего газоснабжения	
Приемо-сдаточные испытания	
ИТОГО	

В общем случае станция может вырабатывать как электрическую, так и тепловую энергию, причем, тепловая энергия, полученная от электросиловых агрегатов, является побочным продуктом их работы. При недостаточности тепловой энергии, полученной данным способом, на станции устанавливаются пиковые котлы. Таким образом, годовые эксплуатационные затраты *i*-м шаге жизни проекта определяются как сумма:

$$З_i = З_{гi} + з_{уд.эi}W_{гi} + з_{уд.тi}Q_{пкi}; \quad (4)$$

где $З_{гi}$ – годовые эксплуатационные затраты, не зависящие от объема выработки электроэнергии; $з_{уд.эi}$ – удельные эксплуатационные затраты, приходящиеся на 1 кВт·час выработанной электроэнергии; $з_{уд.тi}$ – удельные эксплуатационные затраты, приходящиеся на 1 Гкал выработанной тепловой энергии пиковыми котлами; $W_{гi}$ – вырабатываемый станцией годовой объем электроэнергии; $Q_{пкi}$ – годовой объем тепловой энергии, вырабатываемой пиковыми котлами:

$$Q_{пкi} = Q_{гi} - W_{гi}\cdot k_{WQ} \text{ при } Q_{гi} > W_{гi}\cdot k_{WQ}; \quad (5)$$

$$Q_{пкi} = 0 \text{ при } Q_{гi} \le W_{гi}\cdot k_{WQ}, \quad (6)$$

где $Q_{гi}$ – годовой объем тепловой энергии, выработанный всеми агрегатами станции; k_{WQ} – коэффициент, устанавливающий соотношение между объемами электрической и тепловой энергии, вырабатываемыми электросиловыми агрегатами.

Общая структура годовых эксплуатационных затрат одного из возможных вариантов выбора оборудования станции на i-м шаге его жизни представлена в таблице 2.

Таблица 2

Эксплуатационные затраты $З_i$ на реализацию проекта на i-м шаге его жизни

Статья затрат	$З_{гi}$, руб./год	$З_{уд.эi}$, руб./кВт·час	$З_{уд.тi}$, руб./Гкал
Топливо			
Горюче-смазочные материалы			
Амортизационные отчисления			
Обслуживающий персонал			
Ремонтный фонд			
Прочие административные расходы			
Ожидаемый годовой ущерб от перерыва электроснабжения			
ИТОГО			

Продукцией, вырабатываемой электростанцией малой мощности, является электроэнергия. Мини-ТЭЦ, кроме электроэнергии, вырабатывает и тепловую энергию. В общем случае поступления $П_i$ по проекту в i-м периоде определяются как [2]:

$$П_i = П_{эi} + П_{тi}, \tag{7}$$

где $П_{эi}$ – поступления от реализации электроэнергии; $П_{тi}$ – поступления от реализации тепловой энергии.

$$П_{эi} = П_{эмi} + П_{пэi}, \tag{8}$$

где $П_{эмi}$ – поступления от обеспечения заявленной мощности; $П_{пэi}$ – поступления от продажи электроэнергии.

$$П_{эмi} = 12 \sum_{j=1}^{n_т} T_{эмj} P_j \,, \tag{9}$$

где $T_{эмj}$ – ставка за заявленную мощность по j-му тарифу; P_j – заявленная мощность по j-му тарифу, определяемая на основании характеристик потребления электроэнергии от станции; $n_т$ – количество тарифов.

$$П_{пэi} = T_{элi} \, (W_{гi} - W_{г.снi}), \tag{10}$$

где $T_{элi}$ – тариф на отпущенную станцией электроэнергию; $W_{г.снi}$ – годовое потребление электроэнергии на собственные нужды станции.

Поступления от реализации тепловой энергии $П_{тi}$ определяются как:

$$П_{ті} = T_{ті} \cdot (Q_{гі} - Q_{г.сні}), \quad (11)$$

где $T_{ті}$ – тариф на отпущенную станцией тепловую энергию, руб./Гкал; $Q_{г.сні}$ – годовое потребление тепловой энергии на собственные нужды станции.

При сравнении двух рассматриваемых вариантов выбора оборудования станции к реализации принимается тот, ЧДД которого оказывается выше. Разность чистых денежных притоков на i-м шаге:

$$\Delta\varphi^{(1\text{-}2)}{}_i = (П^{(1)}{}_i - П^{(2)}{}_i) - (З^{(1)}{}_i - З^{(2)}{}_i) - (K^{(1)}{}_i - K^{(2)}{}_i).$$

где верхний индекс «$^{(n)}$» соответствует номеру сравниваемого варианта.

Разность ЧДД двух вариантов к горизонту расчета T:

$$\Delta ЧДД^{(1\text{-}2)} = \sum_{i=0}^{T} \frac{\Delta\,\phi^{(1\text{-}2)}{}_i}{(1+r)^i}. \quad (12)$$

Подставляя выражения (4) – (11) для каждого из сравниваемых вариантов в (12), получим условие, позволяющее выбрать наиболее эффективный вариант выбора оборудования мини-ТЭЦ или электростанции малой мощности. Положительное значение $\Delta ЧДД^{(1\text{-}2)}$ говорит об эффективности первого варианта выбора оборудования станции по сравнению со вторым, отрицательное значение $\Delta ЧДД^{(1\text{-}2)}$ говорит об обратном.

На ранних этапах проектирования сравнение двух вариантов выбора оборудования станции можно выполнить, введя в расчет ряд упрощений:

1. Капиталовложения по обоим проектам осуществляются только на нулевом шаге жизни.
2. Поступления и эксплуатационные затраты обоих проектов производятся с первого шага их жизни.
3. Неизменность годовых поступлений и эксплуатационных затрат в течение срока жизни проекта до наступления горизонта расчета T.
4. Равенство для сравниваемых вариантов объемов вырабатываемой электроэнергии и выдаваемой в электрическую сеть мощности.

В соответствии с введенными допущениями справедливо:

$$K = \sum_{i=0}^{T} \frac{K_i}{(1+r)^i};$$

$$T^{(1)}{}_{эмі} = T^{(2)}{}_{эмі} = T_{эм};$$
$$P^{(1)}{}_i = P^{(2)}{}_i = P;$$
$$W^{(1)}{}_{гі} = W^{(2)}{}_{гі} = W_г;$$
$$W^{(1)}{}_{г.сні} = W^{(2)}{}_{г.сні} = W_{г.сн};$$
$$n^{(1)}{}_{ті} = n^{(2)}{}_{ті} = n_т.$$

Таким образом, исходные выражения упрощаются:

$$\Delta П^{(1\text{-}2)}{}_{эм i} = 0;$$

$$\Delta П^{(1\text{-}2)}{}_{пэ i} = W_{г i}\,(T^{(1)}{}_{эл i} - T^{(2)}{}_{эл i}) - W_{г.сн i}\,(T^{(1)}{}_{эл i} - T^{(2)}{}_{эл i});$$

$$\Delta П^{(1\text{-}2)}{}_{т i} = T^{(1)}{}_{т i}\,(Q^{(1)}{}_{пк i} - Q^{(1)}{}_{г.сн i}) - T^{(2)}{}_{т i}\,(Q^{(2)}{}_{пк i} - Q^{(2)}{}_{г.сн i}) + \\ + W_{г i}(T^{(1)}{}_{т i} k^{(1)}{}_{WQ} - T^{(2)}{}_{т i} k^{(2)}{}_{WQ});$$

$$\Delta З^{(1\text{-}2)}{}_{i} = (З^{(1)}{}_{г} - З^{(2)}{}_{г}) + W_{г}(з^{(1)}{}_{уд.э} - з^{(2)}{}_{уд.э}) + (з^{(1)}{}_{уд.т} Q^{(1)}{}_{пк} - з^{(2)}{}_{уд.т} Q^{(2)}{}_{пк}).$$

Подставляя в выражение (12) полученные упрощения, получим:

$$\Delta ЧДД^{(1\text{-}2)} = \\ = \left[W_{г}\left(\Delta T^{(1\text{-}2)}{}_{эл} + \Delta\left(T_{т} k_{QW}\right)^{(1\text{-}2)} - \Delta з^{(1\text{-}2)}{}_{уд.э}\right) + \Delta\left(T_{т} Q_{пк}\right)^{(1\text{-}2)}\right]\frac{(1+r)^{T} - 1}{r(1+r)^{T}} - \\ - \left(W_{г.сн}\Delta T^{(1\text{-}2)}{}_{эл} + \Delta\left(T_{т} Q_{г.сн}\right)^{(1\text{-}2)} + \Delta З^{(1\text{-}2)}{}_{г} + \Delta\left(з_{уд.т} Q_{пк}\right)^{(1\text{-}2)}\right)\frac{(1+r)^{T} - 1}{r(1+r)^{T}} - \\ - \Delta K^{(1\text{-}2)}. \qquad (13)$$

Учитывая то, что обычно при проектировании мини-ТЭЦ или электростанции малой мощности годовая выработка электроэнергии $W_{г}$ известна, получим выражение, в соответствии с которым можно определить целесообразность применения соответствующего варианта выбора оборудования станции. Для этого преобразуем выражение (14) относительно годовой выработки электроэнергии $W_{г}$:

$$W_{г} > \frac{\Delta K^{(1\text{-}2)}}{\left[\Delta T^{(1\text{-}2)}{}_{эл} + \Delta\left(T_{т} k_{QW}\right)^{(1\text{-}2)} - \Delta з^{(1\text{-}2)}{}_{уд.э}\right]\frac{(1+r)^{T} - 1}{r(1+r)^{T}}} - \\ - \frac{\Delta\left(T_{т} Q_{пк}\right)^{(1\text{-}2)} - W_{г.сн}\Delta T^{(1\text{-}2)}{}_{эл} - \Delta\left(T_{т} Q_{г.сн}\right)^{(1\text{-}2)} - \Delta З^{(1\text{-}2)}{}_{г} - \Delta\left(з_{уд.т} Q_{пк}\right)^{(1\text{-}2)}}{\Delta T^{(1\text{-}2)}{}_{эл} + \Delta\left(T_{т} k_{QW}\right)^{(1\text{-}2)} - \Delta з^{(1\text{-}2)}{}_{уд.э}}. \qquad (14)$$

При выполнении данного условия первый вариант выбора оборудования станции будет более предпочтительным по сравнению со вторым, невыполнение говорит об обратном. В соответствии с полученным критерием можно оп-

ределить минимальный объем электроэнергии, ежегодно вырабатываемый станцией, при котором реализация варианта, имеющего более высокие капитальные *K*, но низкие эксплуатационные З затраты, является экономически целесообразной. Полученное выражение (14) позволяет определить наиболее оптимальный вариант выбора оборудования мини-ТЭЦ или электростанции малой мощности.

Библиографический список

1. **Вагин, Г. Я., Лоскутов, А. Б., Солнцев, Е. Б., Воеводин, А. Г., Соснина, Е. Н., Мамонов, А. М., Петров, А. А.** Концепция применения и основные технические решения типового ряда мини-ТЭЦ// Промышленная энергетика, №7, Июль 2010. — с. 2-6.
2. **Вагин, Г. Я., Лоскутов, А. Б., Головкин, Н. Н., Солнцев, Е. Б.,**
3. **Мамонов, А. М.**, "Технические и экономические критерии выбора мощности мини-ТЭЦ на промышленных предприятиях (часть 1)," Промышленная энергетика, Выпуск 4, 2006.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Коссов, В. В., Лившиц, В. Н., Шахназаров, А. Г. — МоскваЭкономика, 2000. — с. 421.
5. **Вагин, Г. Я., Лоскутов, А. Б., Головкин, Н. Н., Солнцев, Е. Б.,**
6. **Мамонов, А. М**., "Технические и экономические критерии выбора мощности мини-ТЭЦ на промышленных предприятиях (часть 2)," Промышленная энергетика, Выпуск 5, 2006.
7. **Вагин, Г. Я., Лоскутов, А. Б., Петров, А. А.,** "Методика составления бизнес-планов сооружения мини-ТЭЦ с газопоршневыми агрегатами," Энергетические установки и теплотехника: Труды НГТУ, Т. 3, 2012. — с. 126-133.

УДК 621.311.1

Е.Н. СОСНИНА, Р.Ш. БЕДРЕТДИНОВ, Д.С. АСТАШЕВ

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ 20 КВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Одной из проблем распределительных электрических сетей России является высокий уровень потерь электрической энергии. Существующие сети 6(10) практически исчерпали свой ресурс по пропускной способности. Для решения указанной проблемы предлагается переход на напряжение 20 кВ. В статье рассмотрен зарубежный и отечественный опыт применения сетей напряжением 20 кВ.

***Ключевые слова*:** распределительная электрическая сеть, потери электрической энергии, пропускная способность, распределительное устройство.

В России средний рост потребления электрической энергии составляет 2% в год, а в ряде городов (Москва, Санкт-Петербург, Тюмень) достигает значения более 10 % в год [1]. В республиках Северного Кавказа (Дагестан, Ингушетия) максимум потребления электроэнергии на 50-90% превышает максимальные показатели советского периода. В 14 регионах России уровень максимальных электрических нагрузок превысил аналогичные значения 1990 года (Москва и Московская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область, Тюменская область и другие). Существующие электрические сети 6(10) кВ перегружены и поэтому не способны обеспечить необходимую пропускную способность. Одним из путей решения указанной проблемы является переход на напряжение 20 кВ для распределительных сетей [1-5].

Перевод электрических сетей среднего напряжения с 6(10) на 20 кВ позволит перейти на более высокий уровень электроснабжения городских потребителей, увеличить пропускную способность распределительных сетей как минимум в 2–2,5 раза в пределах той же территории, сократить трансформаторные мощности, повысить качество электрической энергии и надежность систем электроснабжения.

Ряд нормативных документов закрепляет приоритет перехода с напряжения 6(10) кВ на напряжение 20 кВ, как перспективное и необходимое направление развития распределительного электросетевого комплекса [1, 6-8].

Десятки стран и регионов мира давно используют напряжение 20 кВ (США, Франция, Германия, Италия, Финляндия, Австрия, и др.). Особенности применения напряжения 20 кВ могут быть рассмотрены на примере распределительных сетей Финляндии (рис. 1) [9].

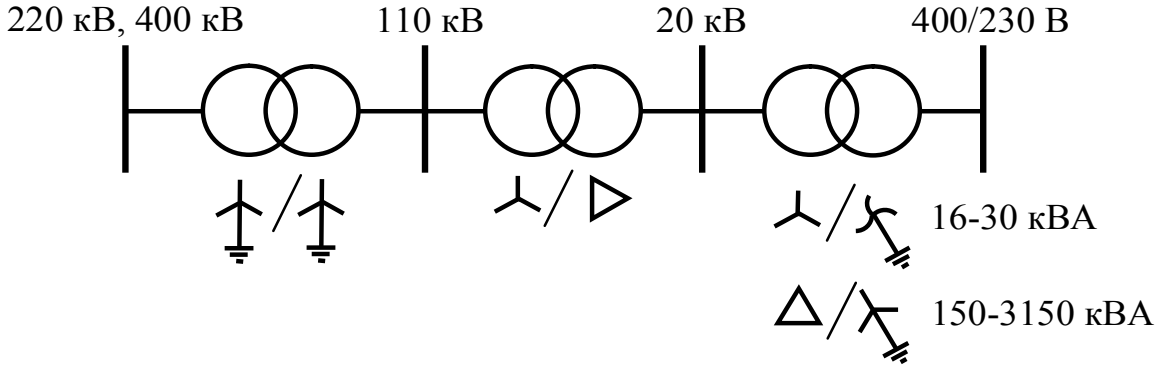


Рис. 1. Напряжения и трансформаторные присоединения в электрических сетях Финляндии

В городах обычно используют двух или трехтрансформаторные подстанции 110/20 кВ с трансформаторами 25, 40 или 63 МВА. На стороне 110 кВ такие подстанции имеют двойную систему шин или одинарную систему с обход-

ной системой шин. На стороне 20 кВ применяется двойная система шин. В сельской местности используются упрощенные, стандартизированные подстанции 110/20 кВ. На них установлены один или два трансформатора мощностью 16 или 25 МВА. На стороне 110 кВ однотрансформаторной подстанции имеет место комбинация «разъединитель, заземлитель и силовой выключатель». В некоторых случаях такая схема дополняется обходным разъединителем, который позволяет выполнять ремонт и обслуживание силового выключателя 110 кВ без отключения подстанции. На стороне 20 кВ сельские подстанции обычно имеют одинарную систему шин или одинарную с обходной систему шин. Для снижения стоимости ТП 20/0,4 кВ конструкция трансформатора претерпела некоторые изменения – был исключен расширительный бак и переключатель ПБВ. Простая и надежная понижающая подстанция малой мощности устанавливается близко к потребителю. При этом резко сокращается протяженность сети 0,4 кВ и существенно снижаются потери. Трансформаторы 20/0,4 кВ малой мощности (16 кВА) присоединяются глухой отпайкой без коммутационного аппарата на стороне высокого напряжения. Разъединитель в этом случае монтируется в точке присоединения отпайки к главному питающему фидеру участка радиальной сети. При более высоких мощностях трансформаторы подключаются через разъединители (рис.2).

Одним из проектов применения сетей напряжением 20 кВ в России является создание интеллектуальной распределительной сети 20/0,4 кВ на территории инновационного центра «Сколково» [10]. Работы ведутся в рамках инвестиционной программы ОАО «ФСК ЕЭС» [8]. Задача создания интеллектуальной сети 20/04 кВ в «Сколково» решается с применением новейших разработок ведущих отечественных и мировых производителей в сфере электроэнергетики, информационных технологий, телекоммуникаций. В проекте предлагаются следующие основные схемные, технические и компоновочные решения. Электрическая сеть 20 кВ строится по двухзвеньевой схеме – с распределительными и соединительными пунктами (РП и СП соответственно). Схема питающих сетей выполняется на двухсекционных РП с устройством автоматического ввода резерва (АВР) на секционном выключателе 20 кВ. Питание РП осуществляется от двух независимых территориально разнесённых центров питания по двум независимым (взаиморезервируемым) кабельным линиям. Между СП питающая электрическая сеть 20 кВ выполняется по принципу магистрали (из двух кабельных линий). СП секционируется на две секции шин 20 кВ с установкой секционных и линейных выключателей нагрузки. Новые РП и СП 20 кВ выполняются малогабаритными блочного типа. В ячейках распределительного устройства (РУ) 20 кВ РП применяются элегазовые силовые выключатели. Распределительная сеть 20 кВ строится по двухлучевой встречной схеме, при которой питание каждой трансформаторной подстанции (ТП) осуществляется по двум взаиморезервируемым кабелям. Для прокладки кабельных линий 20 кВ применяются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

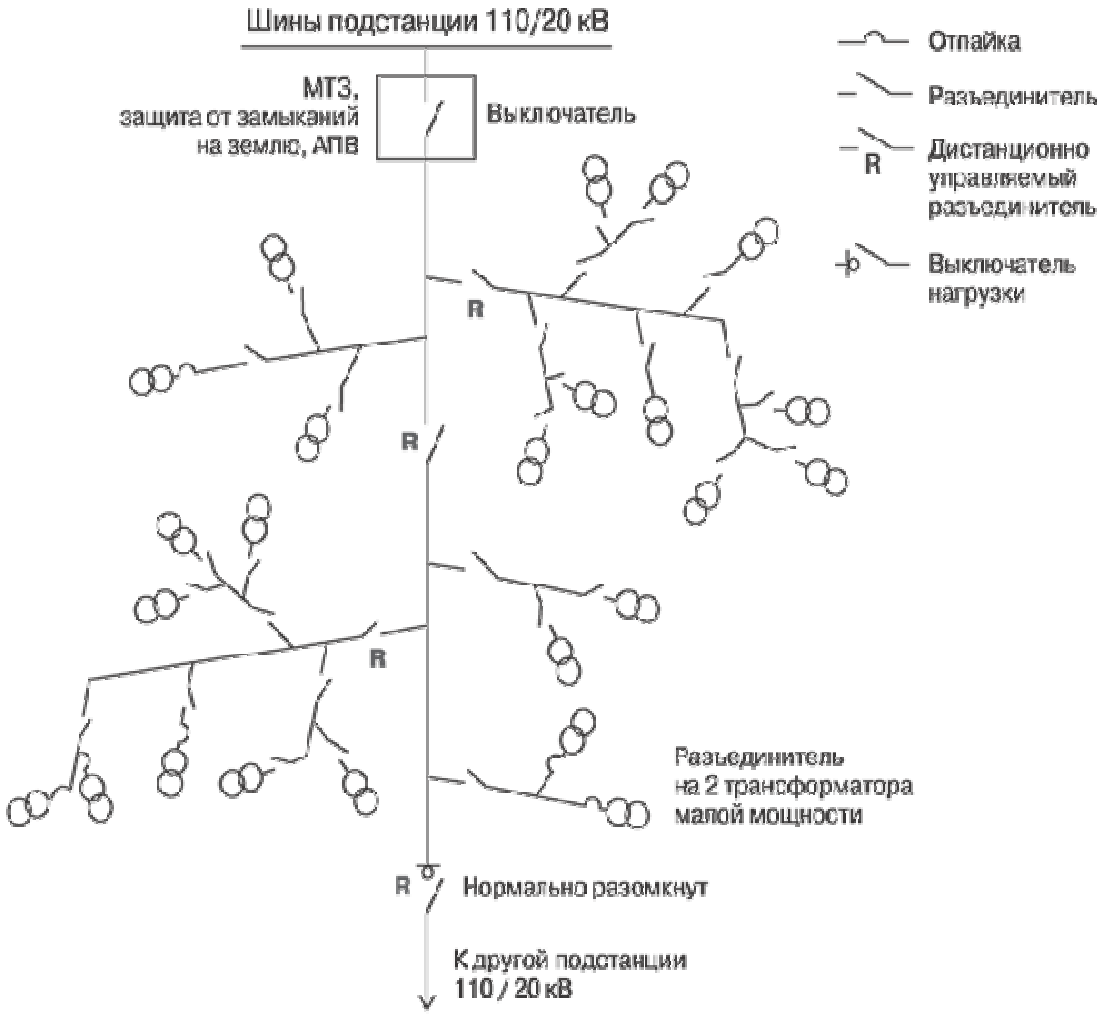


Рис. 2. Радиальная сеть 20 кВ

Несмотря на положительный опыт внедрения напряжения 20 кВ, вопрос перехода на новый уровень напряжения должен быть рассмотрен конкретно в каждом отдельном случае, и решение должно приниматься после проведения технико-экономического анализа, особенно в небольших городах при низкой плотности электрических нагрузок.

Библиографический список

1. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. Утверждено Советом директоров ОАО «Россети». Протокол № 138 от 23.10.2013.

2. **Черепанов В.В.** Повышение эффективности транспортировки и распределения электрической энергии в кабельных линиях путем применения напряжения 20 кВ / В.В. Черепанов, И.А. Суворова // Электрика, 2012. – № 7. – С. 27-30.
3. **Черепанов В.В.** Исследование технико-экономической целесообразности применения напряжения 20 кВ в городских электрических сетях / В.В. Черепанов, И.А. Суворова // Энергобезопасность и энергосбережение, 2012. – №5. – С. 12-14.
4. **Лоскутов А.А.** Применение напряжения 20 кВ для распределительных электрических сетей / А.А. Лоскутов / Труды XVII Нижегородской сессии молодых ученых (Технические науки). – Н.Новгород: НИУ РАНХиГС, 2012. – С. 164-166.
5. **Соснина Е.Н.** Внедрение сетей напряжением 20 кВ для распределительных электрических сетей России / Е.Н. Соснина, И.А. Липужин // Материалы XLIII НТК «Федоровские чтения». – М.: МЭИ, 2013. – С. 159-163.
6. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 511-р от 03.11.2013.
7. СТО 70238424.29.240.10.009-2011. Распределительные электрические сети. Подстанции 6-20/0,4 кВ. Условия создания. Нормы и требования. – Введ. 30.06.2011. – М.: НП «ИНВЭЛ», 2011. – 20 с.
8. Инвестиционная программа ОАО «ФСК ЕЭС» на 2013-2017 годы. Утвержено приказом Министерства энергетики РФ. Приказ № 531 от 31.10.2012.
9. Borscevskis O. 20kV Voltage Adaptation Problems in Urban Electrical Networks [Электронный ресурс]. – URL: http://egdk.ttu.ee (дата обращения 20.10.2014).
10. Создание интеллектуальной распределительной сети 20/0,4 кВ на территории инновационного центра «Сколково» [Электронный ресурс]. – URL: http://glavt.ru/projects/elektroenergetika/sozdanie-intellektualnoy-raspredelitelnoy-seti-20-0-4-kv-na-territorii-skolkovo/ (дата обращения 24.10.2014).

УДК 621.311.24
УДК 681.5.037.7

Е.Н. СОСНИНА, А.В. ШАЛУХО, И.А. ЛИПУЖИН, А.А. СМИРНОВ

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Выполнен анализ классических методов практической и математической оценки статической устойчивости крупных энергосистем. Показана возможность и описаны проблемы применения метода малых колебаний для исследования устойчивости локальных систем электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией (ВДЭС). Предложен подход к оценке статической устойчивости локальной системы электроснабжения с ВДЭС на основе имитационного моделирования.

***Ключевые слова*:** ветро-дизельная электростанция, локальная система электроснабжения, статическая устойчивость, практические критерии, метод малых колебаний, имитационное моделирование.

К 2025 году намечается значительное развитие восточной части России, что потребует широкомасштабной электрификации территорий [1]. Неравномерное распределение генерирующих мощностей крупных электростанций, необходимость сооружения протяженных линий электропередачи (ЛЭП), при низкой плотности населения делают нерентабельным расширение объединенных энергосистем.

Альтернативным вариантом электрификации удаленных территорий России является развитие малой распределенной энергетики [2]. Для электроснабжения энергоудаленных объектов малой мощности в условиях Дальнего Востока и Восточной Сибири наиболее перспективно комбинированное использование ветроустановок (ВЭУ) и дизельных электростанций (ДЭС) [3, 4]. Ввод в эксплуатацию ветро-дизельных электростанций (ВДЭС) позволит получить дополнительные мощности без строительства крупных электростанций и протяженных ЛЭП, сократить завоз топлива, повысить энергетическую независимость потребителей.

Обязательным условием существования и нормального функционирования любой электроэнергетической системы, в том числе и локальной системы электроснабжения с ВДЭС, является обеспечение ее устойчивой работы.

Статической и динамической устойчивости крупных энергосистем посвящено много работ. Вопросы устойчивости локальных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии практически не изучены. Это делает актуальным исследование применимости классических методов к оценке статической устойчивости локальных энергосистем небольшой мощности (десятки кВт).

Классический анализ статической устойчивости включает два этапа: 1) определение факта устойчивости или неустойчивости установившегося режима; 2) определение характера переходного процесса [5].

Характер переходного процесса устанавливается по виду кривой или другим признакам и может быть апериодическим или колебательным. Апериодическая неустойчивость возникает при нарушении баланса моментов на валу генератора. Анализ колебательной устойчивости предполагает учет динамики элементов системы посредством ее модели, описываемой дифференциальными уравнениями. Определение характера переходного процесса (второй этап анализа статической устойчивости) является весьма трудоемким и применительно к локальным системам электроснабжения с ВДЭС рассматриваться не будет.

Факт устойчивости или неустойчивости установившегося режима (первый этап анализа) в крупных энергосистемах определяется одним из методов: на основе практических критериев устойчивости или на основе математической оценки (методом малых колебаний).

Практические критерии основаны на физических представлениях о механизме нарушения устойчивости и позволяют установить предельный режим и границу устойчивости при выбранном способе воздействия на систему электроснабжения. На рис. 1 приведен алгоритм практической оценки статической устойчивости.

Рис. 1. Практическая оценка статической устойчивости

Для локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией (ЛСЭС с ВДЭС) наиболее близкой является вид схемы замещения с эквивалентным источником, питающим комплексную нагрузку соизмеримой мощности (рис.2).

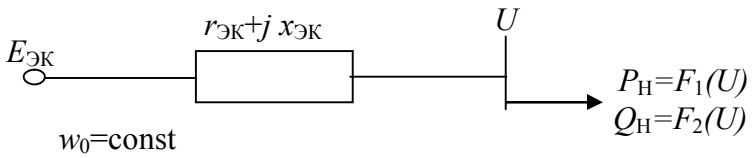


Рис. 2. Схема замещения с эквивалентным источником и нагрузкой соизмеримой мощности

В точке подключения нагрузки состояние равновесия характеризуется изменяющимися параметрами режима U, PH=F1(U), QH=F2(U).

Критерий устойчивости: $\frac{dE_{ЭК}}{dU} > 0$.

Практическая оценка статической устойчивости является завышенной по запасу устойчивости, но позволяет установить факт устойчивости режима. И этого вполне достаточно для ЛСЭС с ВДЭС. Но при использовании практических критериев оценки вводится ряд допущений: напряжение приемной системы постоянно; крутящий момент и мощность развиваемая турбиной не зависит ни от времени, ни от угла δ (между ЭДС и напряжением); частота системы постоянна; скорость вращения ротора синхронной машины изменяется в малых пределах от синхронной скорости.

Основные особенности ЛСЭС с ВДЭС заключаются в нестабильном графике выдачи мощности ВЭУ вследствие стохастического характера изменения скорости и плотности ветра и нестабильном графике нагрузки при соизмеримых мощностях генерирующих энергоустановок и электроприемников [6]. Данные особенности не позволяют корректно использовать методику практической оценки статической устойчивости для ЛСЭС с ВДЭС.

В отличие от практической оценки статической устойчивости математическая оценка заключается в исследовании уравнений движения, записанных в виде уравнений малых колебаний [7]. Состояние системы электроснабжения в любой момент времени можно описать дифференциальным нелинейным уравнением возмущенного движения вида:

$$Y(t, y_i, \frac{d^k y_i}{dt^k}) = F(f_i, \frac{d^l f_i}{dt^l}), i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L} \quad (1)$$

где y_i - совокупность показателей режима системы электроснабжения, которые являются функциями времени; f_i - внешние воздействия, изменение которых может быть произвольным.

На рис. 3 приведен алгоритм математической оценки статической устойчивости.

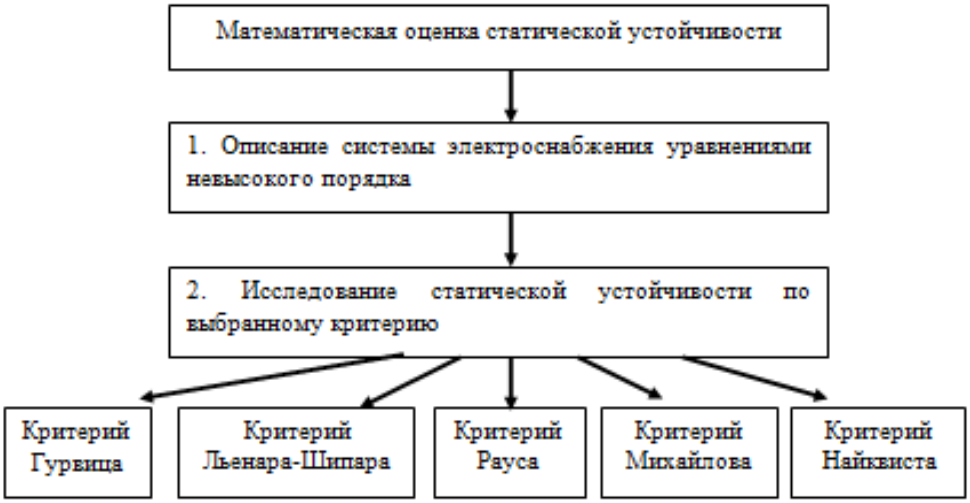


Рис. 3. Алгоритм математической оценки статической устойчивости

Например, математическая модель движения ветрогенератора будет представлена:

$$M_{в} - M_{г} = J\frac{d\Omega}{dt}, \quad (2)$$

где $M_в$ – вращающий момент турбины, Н·м; $M_г$ – тормозной момент электромашинного генератора, Н·м; J – момент инерции вращающихся масс ветрогенератора, кг·м^2; Ω – угловая скорость ветрогенератора, рад/с.

Для дизель-генератора уравнение движения вращающихся частей примет следующий вид:

$$M_{в} - M_{г} = J\frac{d\Omega}{dt}, \quad (3)$$

где $M_{дд}$ – момент, развиваемый дизельным двигателем, Н·м; $M_н$ – момент нагрузки на валу, Н·м; $J_{дд}$ – момент инерции дизельного двигателя, кг·м^2; $J_{сг}$ – момент инерции генератора, кг·м^2; Ω – угловая частота вращения вала, рад/с.

Методика математической оценки, основанная на составлении дифференциальных уравнений, может быть применена для точной оценки статической устойчивости ЛСЭС с ВДЭС. Однако при использовании данного подхода возникнет ряд проблем: 1) математическое моделирование не позволит ввести количественные показатели устойчивости и численно оценить их; 2) сложность схемы сопряжения источников энергии с нагрузкой требует разработки большого числа математических моделей для ее отдельных компонентов, следствием чего является большая вероятность возникновения погрешностей и ошибок при расчетах; 3) внесение изменений в схему (потребует пересмотра математических уравнений и их связи, что усложнит анализ устойчивости работы различных схем сопряжения источников и нагрузки.

Данные недостатки в значительной степени устраняются при использовании имитационного моделирования. Изменение основных электрических параметров с помощью модели (электрической нагрузки и скорости ветрового потока) позволит установить закономерности функционирования и оценить: взаимосвязь между причинами и последствиями нарушения устойчивости; количественные показатели устойчивости; устойчивость системы при переходе от одного режима работы к другому.

Библиографический список

1. Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: http://so-ups.ru (дата обращения: 10.11.2014)
2. Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределенная энергетика» от 03.02.2011 г.
3. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2020 года
4. **Филиппов, С. П.** Перспективы применения электрогенерирующих установок малой мощности / С. П. Филиппов // Атомная энергия. 2011. №5.

5. **П.С. Жданов.** Вопросы устойчивости электрических систем / Под. ред. Жукова Л.А. // М.: Энергия, 1979. – 456 с.

6. **В.Н. Андрианов.** Ветроэлектрические станции / Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р. // М.: Госэнергоиздат,1960. – 320 с.

7. **В.А. Веников.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах / Веников В.А. // М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

УДК 621.311

Е.Н. СОСНИНА, Е.В. КРЮКОВ, Л.Е. ВЕСЕЛОВ

О ПРИМЕНЕНИИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ТОТЭ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассмотрены особенности электроснабжения ответственных потребителей электроэнергии. Для повышения надежности и длительности бесперебойного электроснабжения таких потребителей предложено использование энергоустановок на топливных элементах. Рассмотрен принцип действия данных энергоустановок.

Ключевые слова: ответственные электропотребители, твердооксидные топливные элементы, гибридные энергоустановки.

Необходимыми условиями устойчивой работы ответственных потребителей электрической энергии являются высокая надежность и длительность бесперебойного электроснабжения.

Нарушение электропитания ответственных потребителей может привести к возникновению угрозы жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также угрозы негативного воздействия на окружающую среду [1].

Перечень ответственных потребителей и субъектов электроэнергетики определен в рамках проекта технического регламента «О безопасности при нарушениях электроснабжения» [2].

В Правилах устройства электроустановок такие потребители отнесены к особой группе первой категории (нулевой категории) по надежности электроснабжения, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы для жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего оборудования [3].

Для особой группы первой категории, должно быть предусмотрено три независимых источника электропитания. В роли третьего независимого источника, могут использоваться различные аппараты бесперебойного электропитания, аккумуляторные батареи, дизель-генераторы и другие автономные источники энергии.

Наиболее сложной является задача обеспечения бесперебойного электроснабжения энергоудаленных ответственных потребителей, когда строительство отдельного независимого источника питания представляется экономически нецелесообразным [4]. Примерами таких электропотребителей являются воинские части и другие объекты вооруженных сил, объекты горной промышленности, линейные потребители магистральных газопроводов, метеостанции, системы связи и оповещения и другие.

Надёжным источником электроснабжения энергоудаленных ответственных потребителей могут стать энергоустановки на основе топливных элементов (ТЭ) [5]. Отличительной особенностью ЭУ на основе ТЭ является использование принципа прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую, минуя традиционные стадии преобразования энергии (химическая – тепловая – механическая – электрическая). В отличие от гальванических элементов, вещества для электрохимической реакции подаются в ТЭ извне [6]. Данные источники вырабатывают электроэнергию непосредственно в результате высокоэффективного «холодного» горения топлива. Благодаря этому экономичность ЭУ на ТЭ почти вдвое выше, чем у традиционных ЭУ, и КПД может достигать от 70 до 85 % с учетом утилизации тепла. Из-за отсутствия непосредственного химического контакта топлива с окислителем количество вредных выбросов ЭУ на ТЭ почти в 100 раз ниже традиционных.

В настоящее время существуют различные типы топливных элементов. Основной является классификация ТЭ по составу электролита (рисунок 1) [7].

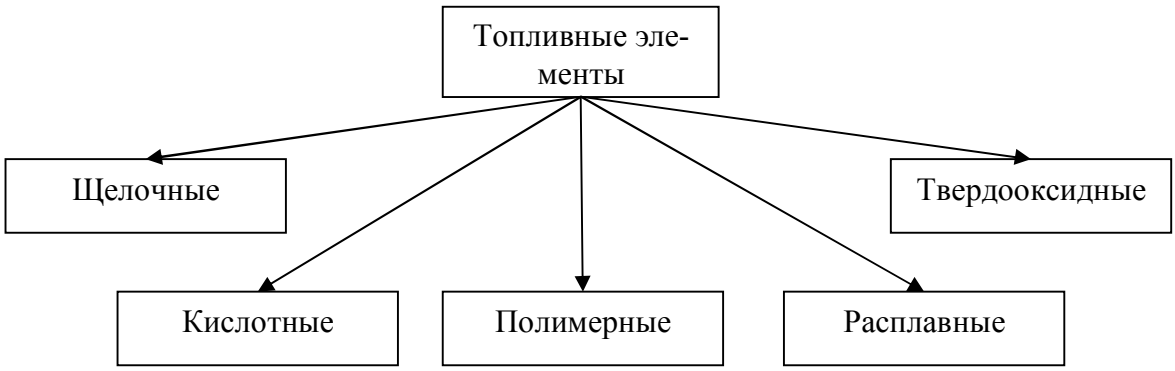


Рис. 1. Классификация топливных элементов по составу электролита

Анализ характеристик существующих типов ТЭ показывает, что для широкомасштабного применения в энергетике наиболее перспективны ЭУ на базе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [8]. Электролитом в ТОТЭ является керамический материал (например, на базе диоксида циркония), проницаемый для ионов кислорода. Ионы кислорода проходят через твердый оксид и при высокой температуре (700—1000 °С) реагируют с водородом на аноде [9]. ТОТЭ применяются в основном для стационарных ЭУ мощностью от 1 кВт и выше.

Традиционным топливом в ТОТЭ является синтез-газ, который производится из любых ископаемых – угля, нефти, природного газа (метана) или из синтезированных углеводородов, биогаза.

ТОТЭ перспективны с точки зрения конструктивно–компоновочных решений, технологичности изготовления и эксплуатации. Энергоустановки на ТОТЭ обладают автономностью, минимальным обслуживанием, высоким ресурсом работы [10].

Основными недостатками ЭУ на ТОТЭ являются их высокая стоимость и высокая рабочая температура. Чтобы данные ЭУ стали экономически конкурентоспособными на рынке, необходимо преодолеть ряд технических и технологических проблем и, в первую очередь, снизить рабочую температуру ТОТЭ до 500-600оС, обеспечив при этой температуре высокую ионную проводимость используемых твердых электролитов.

Ведущими мировыми фирмами-производителями ЭУ на ТОТЭ являются «Cummins-SOFCo», «Delphi-Battelle», «General Electric», «Siemens-Westinghouse Power Corporation», «Acumentrics», «FuelCell Energy», «Solid Cell», «Horizon Fuel Cell Technologies», «BloomEnergy» и другие.

В России работы в данном направлении ведутся в Российском федеральном ядерном центре - ВНИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск), Уральском отделении Российской академии наук (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», НИЦ «Курчатовский институт», ООО «Уральская производственная компания» и других научно-исследовательских организациях.

Имеющиеся недостатки пока не позволяют широкомасштабно применять энергоустановки на основе ТОТЭ для электроснабжения потребителей. Необходимо проведение исследований, направленных на оптимизацию работы данных энергоустановок, изучение особенностей функционирования и управления ими. Перспективным направлением разработок является комбинирование ТОТЭ, аккумуляторных батарей и емкостных накопителей, что позволяет создать систему с высокой эффективностью производства, хранения, накопления и распределения электроэнергии.

Разработка энергоустановок на основе ТОТЭ и применение их в системах электроснабжения приведет к повышению эффективности, надежности и длительности бесперебойного электропитания ответственных потребителей.

Библиографический список

1. **Гарганеев, А.Г.** Системы аварийного электроснабжения ответственных потребителей переменного тока: учебное пособие / А.Г. Гарганеев. – М.: Томский политехнический университет, 2009. – 228 с.
2. Проект технического регламента «О безопасности при нарушениях электроснабжения». – Москва, 2014.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ 6 и 7 издания, все действующие разделы). – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2014. – 464 с.

4. **Сомов, С.И.** Состояние исследований, разработок и практического применения твердооксидных топливных элементов / С.И. Сомов // Сборник статей «Твердооксидные топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Черноголовка, 2013.
5. **Липилин, А.С.** Роль твердооксидных топливных элементов в стратегии развития энергетики / А.С. Липилин // Альтернативная энергетика и экология, № 9, 2009.
6. **Хорошев, В.Г.** Разработка, изготовление и поставка опытного образца электрохимического генератора на основе высокотемпературных твердооксидных топливных элементов / В.Г. Хорошев // Сборник статей «Твердооксидные топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Черноголовка, 2013.
7. **Бредихин, С.И.** Разработка элементной базы ТОТЭ планарной конструкции / С.И. Бредихин // Сборник тезисов «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Черноголовка, 2013.
8. **Киселев, И.В.** Повышение энергетической эффективности твердооксидных топливных элементов и обоснование их применения для энергоснабжения потребителей малой мощности: автореферат дис. … кандидата технических наук: 05.14.01 / И.В. Киселев – ФГУП «Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно исследовательский институт экспериментальной физики», 2013.
9. **Плотников, Н.С.** Топливные элементы. Особенности использования / Н.С. Плотников // Энергетика и ЖКХ, 2013. - С. 26.
10. **Плотников, Н.С.** Перспективы применения твердооксидных топливных элементов в автономной энергетике / Н.С. Плотников // Энергетика и ЖКХ, 2013. - С. 28.

УДК 317.629.12

В.Г. СУГАКОВ, А.А. ТОЩЕВ, Ю.С. МАЛЫШЕВ

ОЦЕНКА И КОРРЕКЦИЯ НЕБАЛАНСА НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АВТОНОМНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Волжская государственная академия водного транспорта

Рассмотрены существующие стандарты в области качества электрической энергии, а так же, по выявленным критериям качества, предложено автоматизированное устройство оценки небаланса напряжений источника электроэнергии при несимметричной нагрузке фаз.

***Ключевые слова*:** качество электрической энергии, небаланс напряжений источника электроэнергии, устройство оценки небаланса напряжений ИЭЭ.

Под небалансом фазных (линейных) напряжения понимается неравенство фазных (линейных) напряжений в трехфазной системе. Причиной искажение симметрии трехфазной системы может служить асимметрия самого источника и нагрузки. Несимметричность трехфазной системы приводит к появлению

систем обратной и нулевой последовательности, что приводит к отрицательным последствиям.

Для оценки степени неравенства фазных напряжений стандартом /1/ предусмотрен специальный показатель качества электрической энергии – коэффициент $K_{неб}$ небаланса фазных напряжения, который определяется по выражению:

$$K_{неб}=(U_{max}-U_{min})/U_{ном}, \quad (1)$$

где U_{max} – наибольшее из фазных напряжений; U_{min} – наименьшее из фазных напряжений; $U_{ном}$ – номинальное фазное напряжение.

Для автономных источников электрической энергии (ИЭЭ), к которым относятся электроагрегаты судовых электростанций [2], коэффициент $K_{неб}$ небаланса определяется в ходе испытаний. Норма данного показателя качества устанавливается стандартом /3/ на уровне 0,05 или 0,1 при асимметрии фазных токов 25%.

Автоматизированная оценка небаланса напряжений ИЭЭ при несимметричной нагрузке фаз возможна при использовании специального устройства, которое производит измерение фазных напряжений, выявляет из них наибольшее и наименьшее и вычисляет показатель качества.

Схема измерителя представлена на рис. 1. Устройство работает следующим образом. Подачей сигнала на шину 47 измеритель переводится исходное состояние, при котором на выходе счетчиков 17…19 и регистра 13 появляется нулевой код . С выхода счетчика 17 нулевой код подается на вход дешифратора 20 и на его нулевом выходе появляется сигнал открывающий ключ 1. К первичной обмотке трансформатора 10 подключается напряжение фазы А. Появляется напряжение на вторичной обмотке трансформатора 10 и формирователь 43 выдает импульс на вход счетчика 17. На первом выходе дешифратора 20 появляется, а на нулевом исчезает сигнал. Ключ 1 остается в открытом состоянии и на вход АЦП 12 подается первая положительная полуволна напряжения фазы А. Код мгновенного значения напряжения с выхода АЦП 12 подается на первый вход компаратора 21, на второй вход которого поступает нулевой код с выхода регистра 13. Поэтому на выходе «больше» компаратора 21 появляется сигнал и формирователь 42 выдает импульс на запись в регистр 13, кода мгновенного напряжения. При этом коды на выходах компаратора 21 совпадают и сигнал на его выходе «больше» исчезает. С увеличением кода на выходе АЦП 12 на «1» на выходе «больше» компаратора 21 вновь появляется сигнал и с выхода формирователя 42 выдается сигнал на запись кода очередного большего мгновенного значения напряжения в регистр 13.

Перезапись кодов мгновенных значений будет осуществляться до тех пор, пока последующее значение не станет меньше или равным предыдущему. В результате на выходе регистра 13 будет сформирован код амплитуды напряжения фазы А. С приходом третьей положительной полуволны напряжение фазы А

появляется сигнал на третьем выходе дешифратора 20. Сигнал на управляющем входе ключа 1 исчезает, а на управляющем входе ключа 2 появляется и он открывается. Одновременно с третьего выхода дешифратора 20 приходит сигнал на вход формирователя 46. Импульс с выхода формирователя 46 производит запись в регистр 14, кода амплитуды напряжения фазы А, и с некоторой задержкой, обеспеченной линией задержки 41 через элемент ИЛИ 40 обнуляет регистр 13. При открытии ключа 2 и закрытии 1 к первичной обмотке трансформатора 10 подключается фаза В и на выходе регистра 13 аналогично описанному выше, формируется код амплитуды напряжения фазы В. В момент появления третьей полуволны напряжения фазы В появляется сигнал на шестом выходе дешифратора 20 и исчезает на пятом. Ключ 2 отключает от трансформатора 10 фазу В, а в ключ 3 подключает к трансформатору 10 фазу С.

Одновременно импульсом с выхода формирователя 45 осуществляется запись кода амплитуды напряжения фазы В в регистр 15 и обнуление регистра 13. После чего на выходе регистра 13 аналогично формируется код амплитуды напряжения фазы С. К концу второй положительной полуволны напряжение фазы С на выходе регистра 14 имеет место код амплитуды напряжения фазы А, на выходе регистра 15 код амплитуды напряжения фазы В. а на выходе регистра 13 – код амплитуды напряжения фазы С, которые поступают на входы компараторов 22, 23, 24.

Если в исследуемой системе трехфазного напряжения наибольшая амплитуда в фазе А, а наименьшая в фазе В, то появляются сигналы: на выходе «больше» ($U_A>U_B$) компаратора 22; на выходе «больше» ($U_A>U_C$) компаратора 23; на выходе «больше» ($U_C>U_B$) компаратора 24. При этом открывается элемент И27 и появляются сигналы на выходе элемента ИЛИ 35 и 37.

Сигналом с выхода элемента ИЛИ 35 открывается электронный ключ 5, а сигналом с выхода элемента ИЛИ 37 – ключ 7. На вход исходного числа счетчика 19 через ключ 5, с выхода регистра 15 поступает код наименьшей амплитуды напряжения U_B, а на вход регистра 16 через ключ 7 с выхода регистра 14 – код наибольшей амплитуды напряжения U_A. С появлением третьей положительной полуволны напряжения фазы С с выхода формирователя 43 на вход счетчика 17 поступает импульс.

Сигнал на восьмом выходе дешифратора 20 исчезает, выключая ключ 3, снимающий напряжение с трансформатора 10, а на девятом выходе появляется, подготавливая элемент И33 по первому входу. Одновременно импульсом с выхода формирователя 44 в счетчик 19 заносится код наименьшей амплитуды напряжения, а в регистр 16 код наибольшей амплитуды напряжения, которые поступают соответственно на первый и второй входы компаратора 25. На выходе «меньше» компаратора 25 появляется сигнал, подготавливающий элемент И33 по третьем входу.

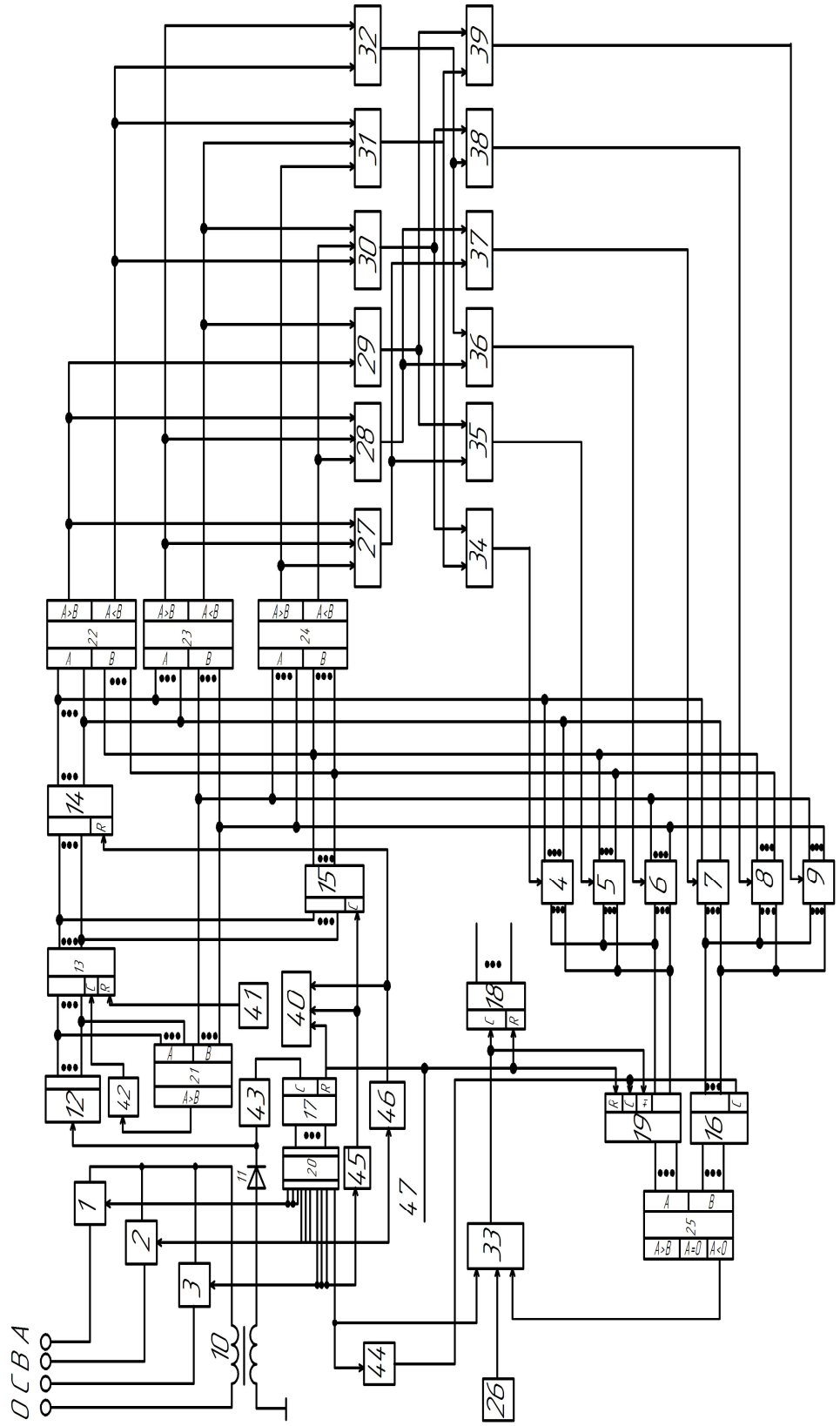


Рис. 1. Устройство оценки коэффициента небаланса напряжений:

1…9 – электронные ключи; 10 – измерительный трансформатор, 11 –диод; 12 – АЦП; 13…16 – буферные регистры памяти; 17…19 – счетчики; 20 – дешифратор; 21…25 – числовые компараторы; 26 – генератор импульсов; 27…33 – логические элементы И; 34…40 –логические элементы ИЛИ; 41 – элемент задержки; 42…46 – формирователи коротких импульсов; 47 – шина СБРОС

Элемент И33 открывается и импульсы с выхода генератора 26 начинают поступать одновременно на счетный вход счетчика 18 и суммирующий вход счетчика 19. При этом код на первом выходе компаратора будет возрастать. Этот процесс будет продолжаться до момента, когда коды на входах компаратора 25 совпадут и сигнал на его выходе «меньше» исчезает. Закрывая элемент И 33 по третьему входу. К этому времени на выходе счетчика 18 сформируется код разности наибольшей и наименьшей амплитуд напряжений исследуемой трехфазной системы, который пропорционален коэффициенту небаланса фазных напряжений и дешифрируется по формуле:

$$K_{НЕБ} = \frac{X_{18} \cdot U_{n12} \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot K_{10} \cdot U_{НОМ}}, \% \qquad (2)$$

где U_{n12} – шаг квантования АЦП 12; K_{10} – коэффициент трансформации трансформатора 10; $U_{НОМ}$ – номинальное действующее фазное напряжение.

Если в исследуемой системе трехфазного напряжения наибольшее и наименьшее напряжение имеют место в других фазах, формирование кода разности напряжений осуществляется аналогично описанному. При любом соотношении фазных напряжений в регистр 16 заносится код наибольшей амплитуды, а в счетчик 19 – наименьшей.

Время измерения коэффициента небаланса напряжений составляет 0,2 с.

Коррекция небаланса напряжений возможна путем последовательного включения в фазы специальных управляемых устройств (вариаторов) (рис.2).

Эти устройства 1, 2 и 3 меняют свои параметры по командам блока управления 4, который формирует управляющее воздействие после анализа отклонения текущих значений фазных напряжений от заданного уровня. В схеме корректора могут использоваться вариаторы 1, 2 и 3 пассивного и активного типа.

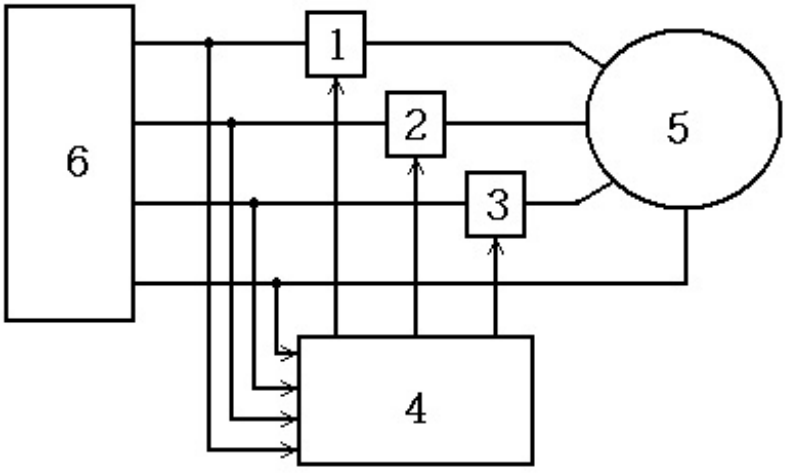


Рис. 2. Схема корректора небаланса напряжений:
1, 2, 3 – вариатор; 4 – блок управления; 5 – ИЭЭ; 6 – нагрузка

В качестве пассивных вариаторов возможно применение резисторов, индуктивностей и емкостей, а в качестве активных вариаторов – вольтодобавочные устройства, например, трансформатор. Достоинством активных вариаторов является возможности изменения напряжения в большую и меньшую сторону, в то время как пассивные вариаторы способны лишь понижать напряжение.

Таким образом, предлагаемые технические средства для автоматической оценки и коррекции небаланса напряжений позволят уменьшить негативные последствия вызванные асимметрией трехфазной системы напряжений.

Библиографический список

1. Качество электрической энергии. Термины и определения : ГОСТ 23875–88. Взамен ГОСТ 23875–79 ; введ. 01.07.89. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

2. ГОСТ Р ИСО 8528-1–2005. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, технические характеристики и параметры. – М.:Изд-во стандартов, 2006. – 13 с.

3. ГОСТ Р 50783-95. Электроагрегаты и передвижные электростанции дизельные. Общие технические условия. – М. : : Изд-во стандартов, 1995. – 20 с.

УДК 621.3

А. Л. КУЛИКОВ, В. А. ПЕТРОВА, Н. С. ЗАИКИНА

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ И УПРОЩЕННОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

В статье произведена оценка параметров аварийных токов и напряжений для устройств релейной защиты, произведен анализ известных и разработанных авторами алгоритмов фильтрации электрических сигналов. Были получены новые алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации токов и напряжений в условиях изменения частоты.

***Ключевые слова*:** дискретное преобразование Фурье, отклонение частоты, упрощенная цифровая фильтрация, электроэнергетическая система, электрический сигнал тока.

В объединённой энергосистеме России принята частота электрического тока 50 Гц. По ГОСТ [1] нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонения частоты равны +/-0,2 и +/- 0,4 Гц. Нормальное значение частоты электрического тока в ЕЭС России составляет 50,00±0.05 Гц [2].

Несмотря на жесткие требования, предъявляемые к допустимым значениям частоты, с 2011 по 2013 г. в ЕЭС России зафиксированы отклонения частоты

от 47 Гц (аварийное отключение двух трансформаторов на подстанции 220 кВ Высокогорная Хабаровского ПМЭС с погашением Бамовского транзита ВЛ 220 кВ на участке Уктур-Высокогорная-Ванино) до 54,4 Гц (отключение Мамаканской ГЭС из-за отключения пяти ВЛ 220 кВ). В результате действия релейной защиты и автоматики, установленных на объектах, происходит аварийное отключение потребителей и выделение энергорайона на изолированную работу с избытком, недостатком мощности.

Одним из примеров отклонения частоты является потеря нагрузки асинхронным генератором в ветровой энергетике [3]. В результате из-за небаланса механической и электромагнитной сил на валу генератора турбина первичного двигателя разгоняет генератор, что и приводит к увеличению частоты (рис. 1.) В таких режимах свойственны резкие и существенные изменения частоты в течение короткого времени.

Наиболее распространенный алгоритм оценки параметров электрического сигнала (ортогональных составляющих) – дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [4]:

$$y_n = \frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} \cdot \cos(\frac{2\pi i}{N});\ y_{\perp n} = -\frac{2}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} \cdot \sin(\frac{2\pi i}{N}), \qquad (1)$$

где x_{n-i} – входной дискретный сигнал тока (напряжения); y_n и $y_{\perp n}$ – ортогональные составляющие x_{n-i}, N – число отчетов на период промышленной частоты.

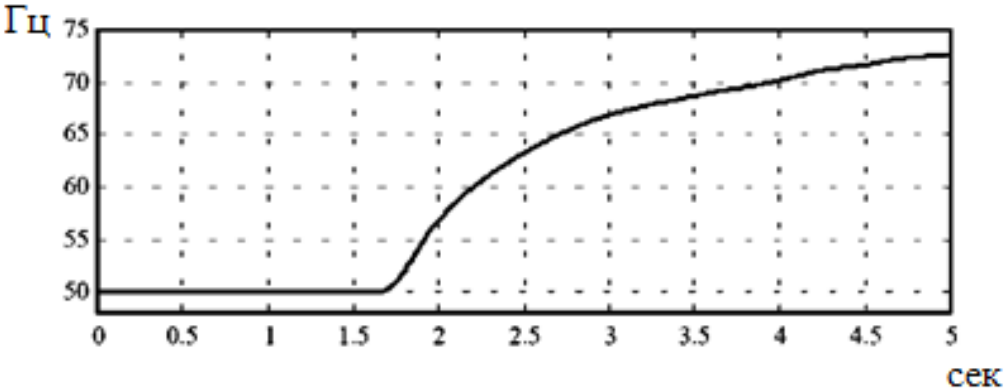


Рис. 1. Оцененное значение частоты по сигналу напряжения на выходе асинхронного генератора при потере нагрузки

Алгоритм чувствителен к изменениям частоты (рис. 2). Например, при отклонении частоты на 5 Гц (45 и 55 Гц), ошибка оценки амплитуды (поз. 3-6 рис. 2) достигает более 10 %, что недопустима по требованиям релейной защиты, например [5].

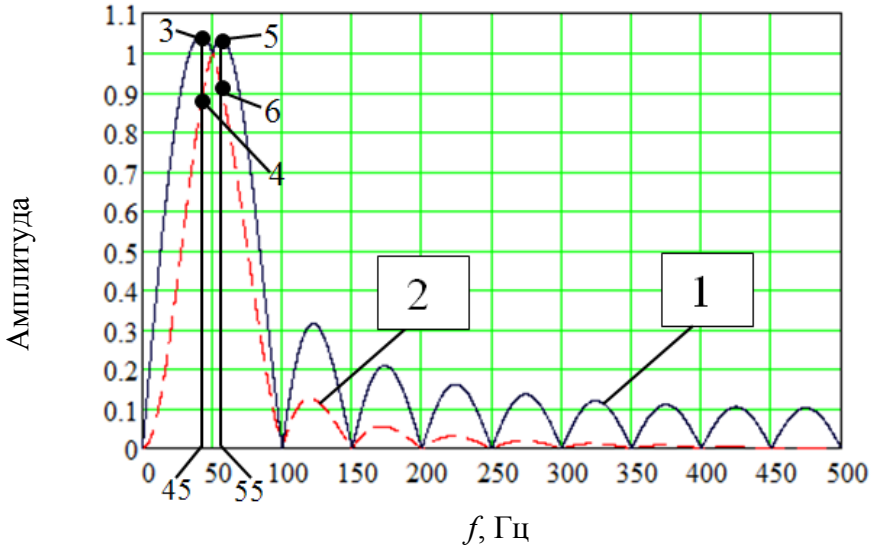


Рис. 2. Результаты расчетов АЧХ для определения амплитуды сигнала (*N*=20) фильтра по алгоритму ДПФ полного периода; поз. 1 – $A_{\max}(f)$; поз . 2 – $A_{\min}(f)$

Известны два способа устранения ошибок традиционных алгоритмов при отклонении частоты. Причем для обоих методов необходимо первоначально вычислять реальную частоту в системе.

1 способ. Путем введения переменного окна данных *M* ДПФ (1) принимает вид [6]

$$y_n = \frac{2}{M}\sum_{i=0}^{M-1} x_{n-i}\cdot\cos(\frac{2\pi i}{M});\ y_{\perp n} = -\frac{2}{M}\sum_{i=0}^{M-1} x_{n-i}\cdot\sin(\frac{2\pi i}{M}), \qquad (2)$$

где *M* – число выборок в окне данных алгоритма.

Однако алгоритм (2) не учитывает случай, когда отношение между реальной промышленной частотой $f_ф$ и частотой дискретизации $f_д$ не является целым числом: $L=S+\delta=f_д/f_ф$, где $0<\delta<1$, *S* – ближайшее меньшее целое число к *L*; *M* – округление величины *L* до целого числа. Естественно такое допущение приводит к погрешностям. Ошибки тем выше, чем меньше $f_д$.

На основе (2) авторами был получен упрощенный алгоритм [7] без ухудшения точности определения параметров электрического сигнала за счет того, что алгоритмы «короткого окна данных» легко настраиваются на фактическую частоту в энергосистеме:

$$g_n = \frac{2}{M}\sum_{i=0}^{M-1} x_{n-i}\cdot\sin(\frac{2\pi i}{M});$$

$$\text{алгоритм "короткого окна" данных:} \qquad (3)$$

$$y_{\perp n} = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi}{L}\right)}\left(g_n\cdot\cos\left(\frac{2\pi}{L}\right) - g_{n-1}\right);\ y_n = g_n.$$

Алгоритм (3) практически в 2 раза проще в реализации по сравнению с (2).

Анализировалась реализация алгоритмов (1)-(3) на модельных сигналах, для которых в период времени от 2,8-3,25 сек. $f_ф$ линейно меняется от 45 до 55 Гц. Как видим адаптивная фильтрация обладает повышенной точностью (рис. 3).

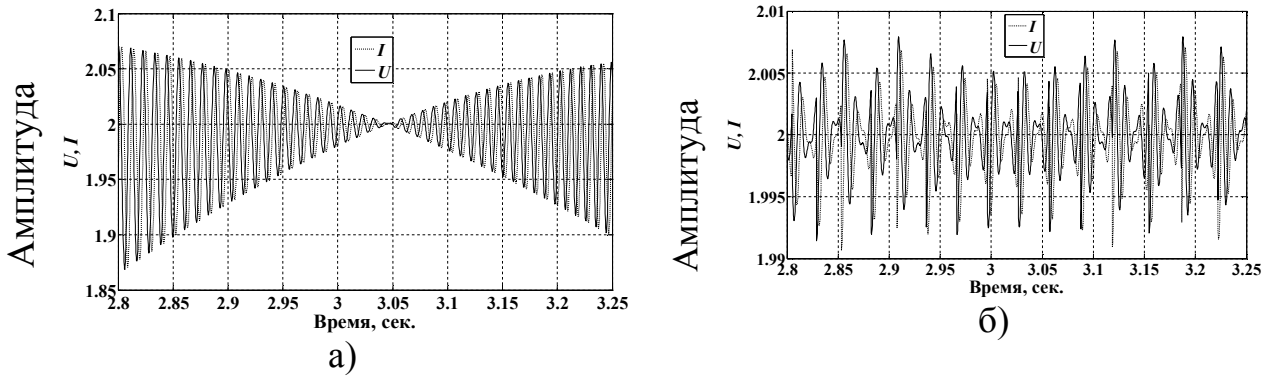


Рис. 3. Результаты моделирования традиционной а), (1) и адаптивной б), (2)-(3) ДПФ-фильтрации

<u>2 способ.</u> В [8] предлагается так называемое модифицированное ДПФ:

$$\bar{y}_{ДПФn} = \frac{1}{T}\left[\frac{\Delta t}{2}\left(x_n + x_{n-S}e^{-jQ\cdot S} + 2\sum_{i=0}^{S-1} x_{n-i}e^{-jQ\cdot i}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{\Delta t^2}{12}\left(x_{n-S}e^{-jQ\cdot S} - x_{n-(S-1)}e^{-jQ\cdot(S-1)} + x_{n-1}e^{-jQ} - x_n\right)\right] = O_n - P_n, \quad (4)$$

где $T=L\ \Delta t$ – период основной частоты электрического сигнала; Δt – интервал дискретизации; $Q=2\pi/L$.

Алгоритм нельзя в полной мере считать полученным на основе ДПФ. Он синтезирован на основе численных методов решения определенных интегралов – метода трапеций. Если для решения определенных интегралов добавление P_n является эффективным методом уточнения [9], то для целей цифровой обработки сигналов (ЦОС) было установлено, что P_n практически не дает уточнения конечному результату ЦОС. Следовательно, использование слагаемого P_n в (4) является избыточным, не эффективным и лишь усложняет в целом алгоритм.

В работе [8] для уточнения выражения (4) при реальных пределах интегрирования [0;L] вводят дополнительную коррекцию вида

$$\overline{K}_n = \delta/(2L)\left[\left(x_n + \left(x_{n-(S+1)} - x_{n-S}\right)\delta\right)\cdot e^{-jQ\cdot L} + x_{n-S}\right], \quad (5)$$

а окончательное выражение цифровой фильтрации с учетом дробного окна данных L имеет вид

$$\overline{y}_{L\,\text{ДПФ}_n} = \overline{y}_{\text{ДПФ}_n} + \overline{K}_n. \qquad (6)$$

Проведенные авторами исследования показали, что алгоритмы (2) и (6) не являются единственными. Были рассмотрены различные сочетания этих алгоритмов (более 20 вариантов). Например, при подстановке в алгоритм (4) вместо значения длины окна данных S величину M [в (4) – комплексная форма записи (7)]

$$y_{\perp n} = \frac{1}{L}\left[x_n + x_{n-M}\cos\left(\frac{2\pi}{L}M\right) + 2\sum_{i=0}^{M-1} x_{n-i}\cdot\cos\left(\frac{2\pi}{L}i\right)\right]; y_n = \\ = -\frac{1}{L}\left[x_{n-M}\sin\left(\frac{2\pi}{L}M\right) + 2\sum_{i=0}^{M-1} x_{n-i}\cdot\sin\left(\frac{2\pi}{L}i\right)\right]. \qquad (7)$$

Принципы упрощенной фильтрации (например, (3)) значительно расширяют количество вариантов получения новых цифровых алгоритмов.

Например:

$$g_n = D\cdot\sum_{i=0}^{M-1}\left[\sin\left(\frac{2\cdot\pi}{L}\left(\frac{M-1}{2}-i\right)\right)\cdot x_{n-i}\right];$$

алгоритм "короткого окна" данных : $y_{\perp n} = \dfrac{1}{\sin\left(\dfrac{2\pi}{L}\right)}\left(g_n\cdot\cos\left(\dfrac{2\pi}{L}\right) - g_{n-1}\right);\ y_n = g_n.$ (8)

где $D = 1\Big/\sum_{n=0}^{M-1}\sin^2\left(\dfrac{2\cdot\pi}{L}\left(\dfrac{M-1}{2}-n\right)\right)$ - постоянный коэффициент для фиксированного значения фактической частоты электрического сигнала.

Отметим, что алгоритм получения в выражении (8) является оригинальной разработкой авторов. Особенность алгоритма – возможность применять его при любой длине окна данных, добиваясь наилучшей настройки к частоте электрического сигнала. Данное свойство позволяет дополнительно в упрощенных алгоритмах сократить вычислительные затраты, так как при снижении fф длина окна данных L возрастает и становится L>N, а благодаря оригинальному алгоритму мы можем зафиксировать окно данных на N:

$$g_n = E\cdot\sum_{i=0}^{N-1}\left[\sin\left(\frac{2\cdot\pi}{L}\left(\frac{N-1}{2}-i\right)\right)\cdot x_{n-i}\right];\ y_{\perp n} = \frac{g_n + g_{n-1}}{2\cdot\cos(\pi/L)};\ y_n = \frac{g_n - g_{n-1}}{2\cdot\sin(\pi/L)}. \qquad (9)$$

где $E = 1\Big/\sum_{n=0}^{N-1}\sin^2\left(\dfrac{2\cdot\pi}{L}\left(\dfrac{N-1}{2}-n\right)\right).$

Следует учитывать, что несмотря на то, что мы в таком случае безошибочно настраиваемся на $f_ф$, с уменьшением окна данных несколько возрастают ошибки фильтрации высших гармоник (см. рис. 4; (8) и (9)).

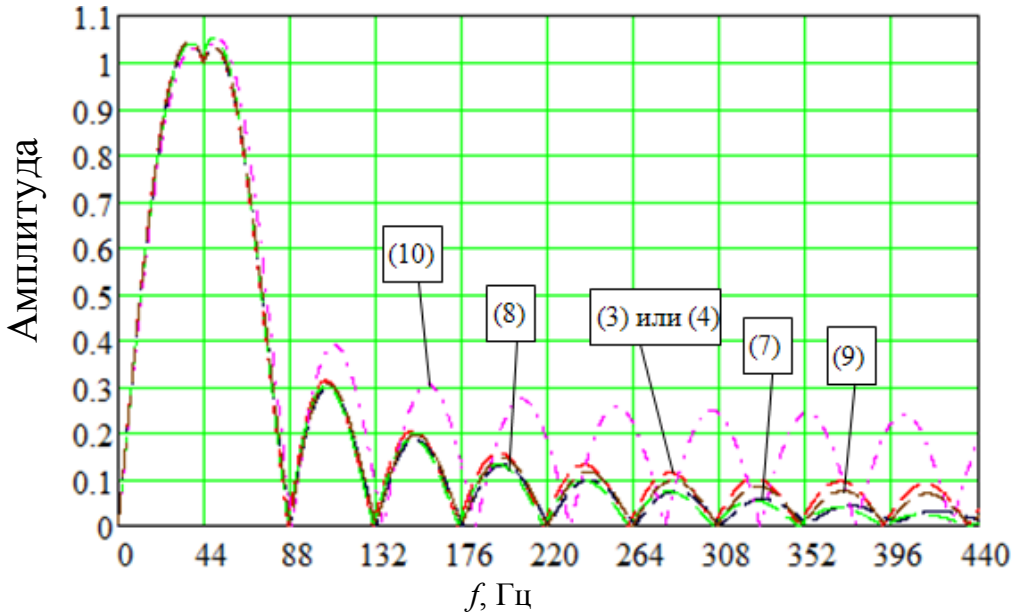


Рис. 4. АЧХ ($A_{max}(f)$) алгоритмов; $f_д$=1800 Гц (N=36); $f_ф$=44 Гц

Выводы:

1. Получены новые алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации токов и напряжений в условиях изменения частоты, обладающие до 2 раз меньшим числом вычислительных операций.

2.Предложенные алгоритмы целесообразны к применению в измерительных органах цифровой релейной защиты, а также в других устройствах, где необходима оценка параметров токов и напряжений промышленной частоты.

Библиографический список

1. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. − Введ. 2014-07-01. − М.: Стандартинформ, 2014. − 20 с.
2. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС»: Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем [Текст]: СТО 59012820.29.240.007-2008 – М: ОАО «ФСК ЕЭС», 2008. – 49 с.
3. **Rebizant, W**. Asynchronous generator behavior after a sudden load rejection [Text] / W. Rebizant, V. Terzija // IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy. – 2003. − Vol. 4. − paper BPT03-75.
4. **Шнеерсон, Э. М.** Цифровая релейная защита [Текст] / Э. М. Шнеерсон. − М: Энергоатомиздат, 2007. − 549 с.
5. **Чернобровов Н. В., Семенов В. А.** Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов: - М.: Энергоатомиздат, 2007, 800 с.
6. **Szafran J., Rebizant W., Michalik M.** Adaptive of power system currents, voltages and im-pedances in off-nominal frequency conditions, Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC'99), Venice,

Italy, Vol. 2, May, 1999, pp. 801-806.
7. **Фальшина В. А., Куликов А. Л.** Алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации электрических сигналов промышленной частоты// Промышленная энергетика. 2012. - № 5 - Стр. 39-46
8. **Xiaojuan Li.** Estimation of power system frequency, phasors and their applications for fault location on power transmission lines. Energy systems centre the school of electrical, electronic and computer engineering, 2007. 190 с.
9. **Н.С.Бахвалов, Н.П.Жидков, Г.М.Кобельков.** Численные методы. М.: Бином, 2003. 630 с.

УДК 621.311

К.С. АВЕРЬЯНОВА, В.П. СТЕПАНОВ, О.В. СОЛЯКОВ

К ОЦЕНКЕ РАСЧЕТНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ

Самарский государственный технический университет
Филиал ОАО «МРСК Волги – Самарские распределительные сети»

Для снижения потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях важным аспектом является оценка повышения энергоэффективности мероприятий по выравниванию графиков электрической нагрузки. В работе получены выражения для коэффициента формы реального графика нагрузки с корреляционными функциями, позволяющие перейти к получению аналитических выражений для оценки потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные электроприемники.

***Ключевые слова*:** график электрической нагрузки, промышленные электрические сети, коэффициент формы, корреляционная функция, потери электрической энергии, электроприемники.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки повышения энергоэффективности мероприятий по выравниванию графиков электрической нагрузки (ГЭН) для снижения потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях.

Цель работы заключается в восстановлении коэффициента формы $К_Ф$ реального $I(t)$ ГЭН по известному коэффициенту формы $К_{Фθ}$ ступенчатого $I_θ(t)$ ГЭН с учетом вероятностного характера его изменения.

Потери активной электроэнергии $ΔW_а$ за расчетное время $T_р$ от реального $I(t)$, изменяющегося во времени ГЭН, протекающего по участку промышленной электрической сети с сопротивлением R, определяется по выражению [1]:

$$\Delta W_{a1} = 3I_э^2 RT_p = 3I_c^2 K_ф^2 RT_p \qquad (1)$$

В (1) используется средняя I_c и эффективная $I_э$, неизменные во времени, нагрузки, которые связаны между собой соотношением из общей теории электрических нагрузок [2]:

$$K_ф = I_э / I_c \tag{2}$$

характеризующее относительную неравномерность реального I(t) ГЭН через коэффициент формы КФ.

На практике, как правило, расчет ΔWa производится по ступенчатому Iθ(t) ГЭН, полученному осреднением реального I(t) графика на M последовательных интервалах осреднения длительностью :

$$\Delta W_{a2} = 3 I_c^2 K_{фθ}^2 R T_p \tag{3}$$

а $К_{Фθ}$ ступенчатого ГЭН определяется по выражению [1]:

$$K_{фθ}^2 = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^{M} I_{rc}^2 / I_c^2 \tag{4}$$

где I_{rc} – средняя нагрузка на r – м интервале осреднения θ, I_c - средняя нагрузка за время T_p.

Однако (4) не соответствует (2) - одному из важнейших соотношений общей теории электрических нагрузок, являясь грубой эмпирической, приближенной оценкой $К_{Фθ}$. Это объясняется тем, что при ступенчатом осреднении ГЭН происходит потеря информации о реальном случайном характере изменения ординат графика, неравномерность которого на интервале θ оценивается реальным $К_Ф$. Поэтому ΔW_{a1} по (1) больше ΔW_{a2} по (3) на относительную величину:

$$\delta(\Delta W_a) = \frac{\Delta W_{a1} - \Delta W_{a2}}{\Delta W_{a1}} = 1 \tag{5}$$

Восстановление $К_Ф$ реального ГЭН производится в рамках общей теории электрических нагрузок [2]. Известно, что $К_Ф$ и $К_{Фθ}$, помимо (2), связаны с вероятностными характеристиками реального $I(t)$ и ступенчатого $I_\theta(t)$ графиков следующими соотношениями [2]:

$$K_ф^2 = 1 + \frac{DI}{I_C^2}; \tag{6}$$

$$K_{фθ}^2 = 1 + \frac{DI_\theta}{I_C^2}, \tag{7}$$

в которых DI и DI_θ - дисперсии реального $I(t)$ и ступенчатого $I_\theta(t)$ ГЭН соответственно. Дисперсия DI_θ ступенчатого ГЭН определяется
формулой проф. Г.М. Каялова [2]:

$$DI_\theta = \frac{2}{\theta^2}\int_0^\theta dr \int_0^\tau K(\tau)d\tau\,, \qquad (8)$$

где K(τ) – корреляционная функция ГЭН, определяющая взаимосвязь между ординатами реального *I(t)* ГЭН и изменение дисперсии *DI* реального *I(t)* ГЭН во времени.

Для общепромышленных (массовых) электроприемников (ЭП), ГЭН которых соответствует свойствам нормального, стационарного случайного процесса, а вероятностная взаимосвязь между его ординатами описывается

корреляционной функцией (КФ) вида:

$$K(\tau) = DI\exp(-\alpha|\tau|)\,, \qquad (9)$$

в [2] получено следующее выражение, связывающее дисперсии *DI* реального и DI_θ ступенчатого ГЭН:

$$DI_\theta = \frac{2DI}{m^2}\left[\exp(-m) + m - 1\right], \qquad (10)$$

где $\alpha = 1/T_к$ - коэффициент затухания вероятностной взаимосвязи, величина обратная постоянной времени корреляции $T_к$ между ординатами реального ГЭН; $m = \alpha\theta = \theta / T_к$ - относительное значение интервала осреднения θ в долях постоянной времени корреляции $T_к$.

Выражение для оценки $К_Ф$, после подстановки *DI* из (10) в (6) с учетом (7), окончательно примет вид:

$$K_ф = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{фθ}^2 - 1)}{2\left[\exp(-m) + m - 1\right]}} \qquad (11)$$

Результаты исследований, приведенные в [3], свидетельствуют, что для большей части общепромышленных, а также специальных промышленных ЭП, таких как дуговые электросталеплавильные печи, буровые установки для разбуривания нефтяных и газовых скважин, углесосные станции угольных шахт, ГЭН представляют собой нормальный, стационарный случайный процесс с КФ вида:

$$K(\tau) = DI\exp(-\alpha|\tau|)\cos\omega_0\tau\,, \qquad (12)$$

в котором косинусоидальная составляющая с частотой ω_0 обусловлена повторяемостью технологических операций. Выражение для $К_Ф$ ГЭН с КФ вида (12) получается подстановкой DI_θ, полученной в [3], в выражении (6) и (7):

$$K_ф = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{фθ}^2 - 1)(1 + k^2)^2}{2\left[(1 - k^2)\exp(-m)\cos km - 2k\exp(-m)\sin km + m(1 + k^2) - 1 + k^2\right]}} \qquad (13)$$

где $k = \omega_0 / \alpha$ - параметр случайного процесса изменения ординат ГЭН, характеризующий его спектральный состав.

Исследования, проведенные в [3], свидетельствуют, что математической моделью, описывающей вероятностную взаимосвязь между ординатами ГЭН ЭП портальных кранов речных и морских портов, а также ЭП предприятий строительной керамики является нормальный, стационарный случайный процесс с КФ видов:

$$K(\tau) = DI\exp(-\alpha|\tau|)(\cos\omega_0\tau - \frac{1}{k}\sin\omega_0|\tau|)\,; \tag{14}$$

$$K(\tau) = DI\exp(-\alpha|\tau|)(\cos\omega_0\tau + \frac{1}{k}\sin\omega_0|\tau|) \tag{15}$$

Подстановка дисперсий DI_θ, полученных в [3], в выражениях (6) и (7) позволяет получить следующие выражения для $К_Ф$ ГЭН с КФ видов (14) и (15):

$$K_\phi = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{\phi\theta}^2 - 1)(1+k^2)^2}{2\left[1 - \exp(-m)\cos km - \frac{1}{k}\exp(-m)\sin km\right]}} \tag{16}$$

$$K_\phi = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{\phi\theta}^2 - 1)(1+k^2)^2}{2\left[(3-k^2)\exp(-m)\cos km + \frac{(1-3k^2)}{k}\exp(-m)\sin km + 2m(1+k^2) - 3 + k^2\right]}} \tag{17}$$

Результаты расчетов $К_Ф$ по (11), (13), (16) и (17) приведены на рис.1.

Анализ кривых, приведенных на рис.1, свидетельствует о разной степени влияния характеристик вероятностного процесса изменения ординат ГЭН на $К_Ф$ реального графика. Так, например, начиная с m=1,5, m=3, m=5 и m=6, для ГЭН с КФ видов (14), (12), (9) и (15) соответственно, отличие $\delta К_Ф$ коэффициента формы $К_Ф$ реального графика от $К_{Ф\theta}$ ступенчатого графика:

$$\delta K_\phi = (1 - \frac{K_{\phi\theta}}{K_\phi})100\%\,, \tag{18}$$

превышает 5%, достигая 10%, 11%, 18,8% и 61% при m=10 для КФ видов (15), (9), (12) и (14) соответственно. Отметим, что с возрастанием $К_{Ф\theta}$ отличие $\delta К_Ф$ для ГЭН со всеми видами КФ возрастает. Увеличение параметра k случайного процесса изменения нагрузки влияет на отличие коэффициента формы $\delta К_Ф$ также как и $К_{Ф\theta}$.

Научной новизной работы являются выражения для $К_ф$ реального ГЭН с КФ видов (12), (14), (15), позволяющие перейти к получению аналитических выражений для оценки потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные ЭП.

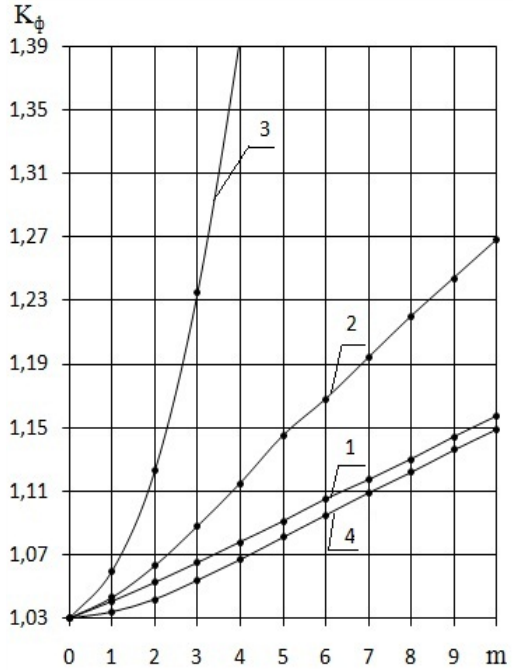


Рис.1. Зависимости $K_Ф$ от *m* при $K_{Фθ}$=1,03 и k=1,0:
кривые 1,2,3,4 – для корреляционных функций видов (9), (12), (14) и (15) соответственно

Библиографический список

1. **Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В.** Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: НЦ ЭНАС, 2006. – 280 с.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий / Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. **Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П.** Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик графиков электрической нагрузки потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 2003 – 257 с.

УДК 621.31

Е.Б. СОЛНЦЕВ, А.М. МАМОНОВ, А.А. ПЕТРОВ

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МИНИ-ТЭЦ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

В статье рассматриваются критерии оценки эффективности выбора количества и мощности мини - ТЭЦ в различных секторах экономики России, которые позволяют повысить надежность их энергоснабжения и в кратчайшие сроки ликвидировать дефицит электроэнергии; Также в статье разработаны рекомендации позволяющие повысить эффективность

систем энергоснабжения и снизить себестоимость вырабатываемой электрической энергии при технико-экономическом анализе проектов, а также при разработке бизнес-планов.

***Ключевые слова*:** малая энергетика, когенерация, мини-ТЭЦ, энергоэффективность, критерии оценки

В последнее время все большее распространение получает практика использования в энергосистемах малой генерации. Однако вопрос об эффективности широкого применения малой генерации, а в частности применения мини-ТЭЦ вызывает сегодня споры среди специалистов.

Самый известный аргумент, приводимый противниками распространения мини-ТЭЦ, – их недостаточная рентабельность, являющаяся следствием низкого КПД малых станций и высокой амортизационной стоимости оборудования. Рассмотрим объективные факторы, определяющие эффективность работы небольших ТЭЦ.

К основным экономическим факторам функционирования мини-ТЭЦ относятся:

- удельная стоимость энергоблоков;
- заявленный ресурс двигателя до капитального ремонта;
- продолжит ремонта
- удельный расход масла;
- зависимость КПД двигателя от мощности и от загрузки;
- удельный расход природного газа.

Первые пять критериев и их зависимости приведены на рисунках 1-5.

Зависимость удельной стоимости энергоблоков, выполненных «под ключ» приведена на рисунке 1.

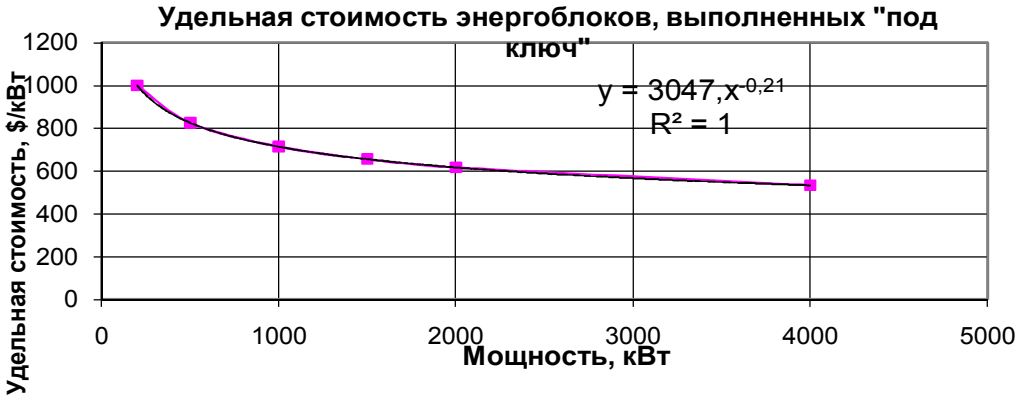


Рис. 1. Зависимость удельной стоимости энергоблоков, выполненных «под ключ»

Из рисунка 1 видно, что удельная стоимость энергоблоков значительно изменяется при широком диапазоне мощностей мини-ТЭЦ. На практике, при выборе мощности агрегата, рассматриваемый диапазон мощности невелик. По

этому, в первом приближении, зависимостью удельной стоимости энергоблоков от мощности можно пренебречь.

Зависимость заявленного ресурса двигателя от мощности мини-ТЭЦ до капитального ремонта приведена на рисунке 2.

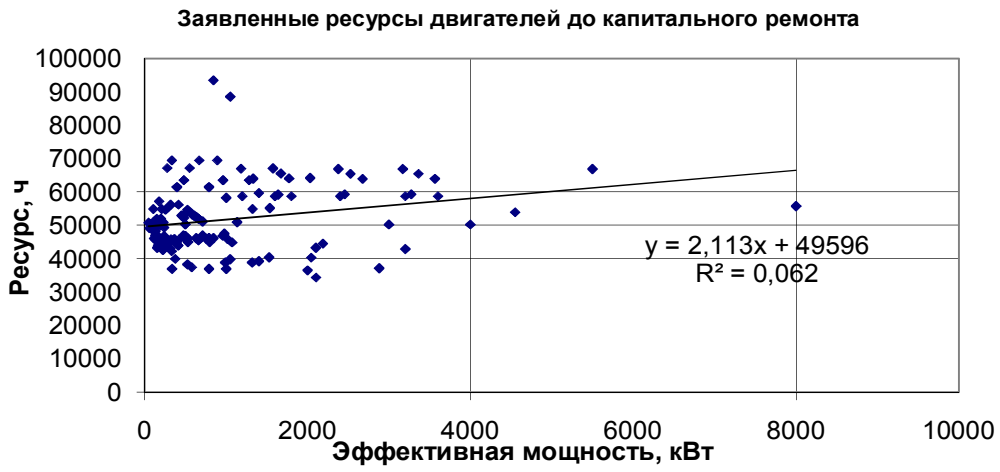


Рис. 2. Зависимость заявленного ресурса двигателя мини-ТЭЦ до капитального ремонта

Из рисунка 2 видно, что заявленный ресурс двигателей до капитального ремонта практически не зависит от мощности мини-ТЭЦ. При одной и той же мощности заявленный ресурс двигателя до капитального ремонта может отличаться в разы и определяется фирмой изготовителем двигателя.

Зависимость продолжительности ремонтов от мощности двигателей приведена на рисунке 3.

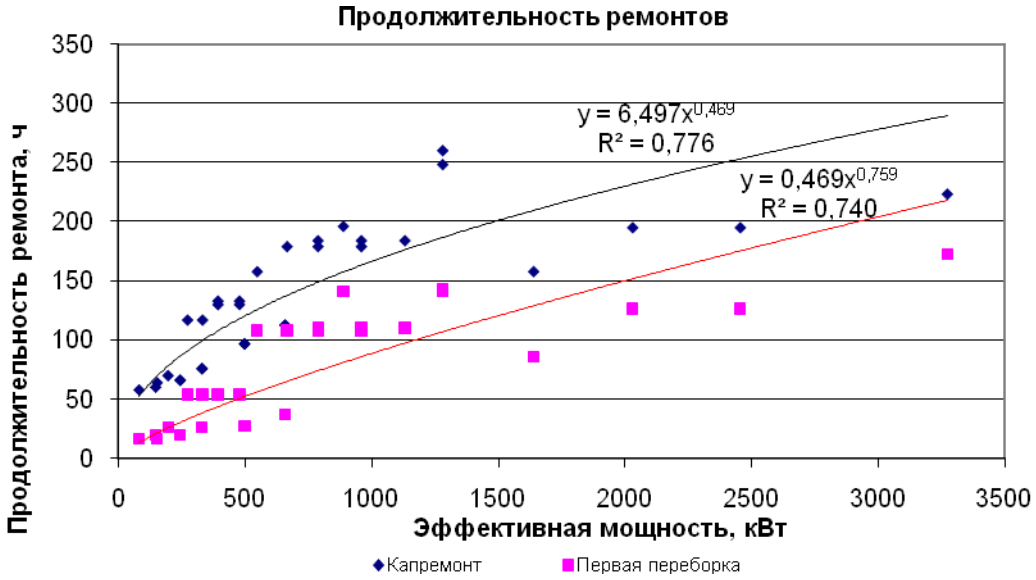


Рис. 3. Зависимость продолжительности ремонтов от мощности двигателей

Продолжительность ремонтов даже для самых «крупных» машин не превышает 3% от годового времени работы и поэтому может в дальнейшем не учитываться.

Зависимость удельного расхода масла (г/кВт*ч) от мощности двигателей приведена на рисунке 4.

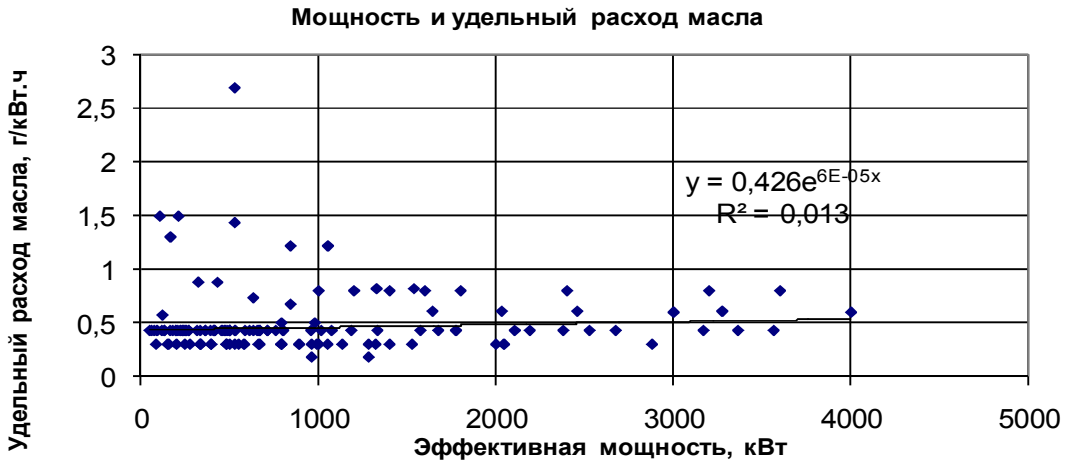


Рис.4. Зависимость удельного расхода масла от мощности двигателей

Из рисунка видно, что корреляция удельного расхода масла и мощности двигателя отсутствует.

Зависимость КПД двигателя от мощности приведена на рисунке 5, а от загрузки - на рисунке 6.

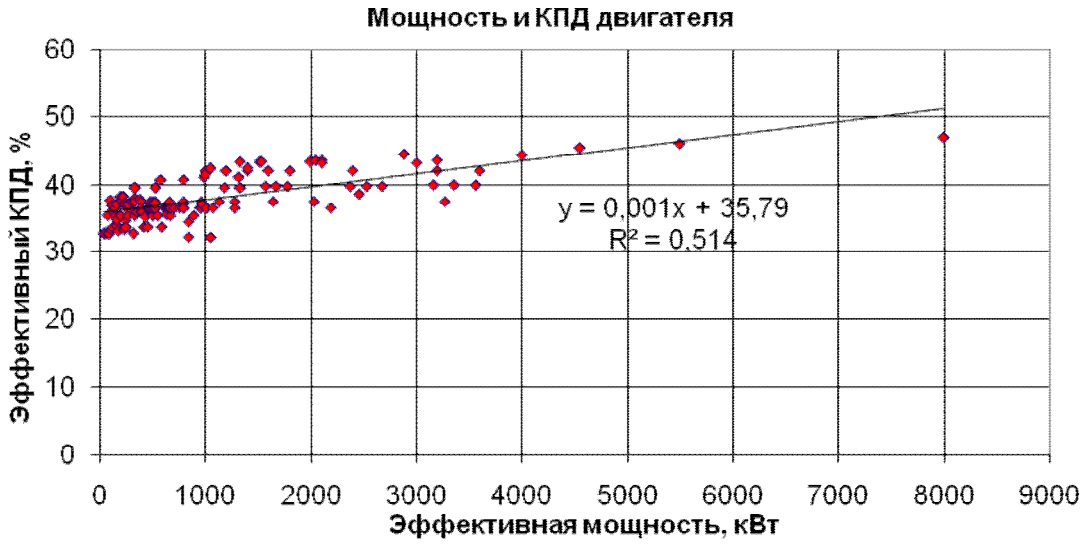


Рис.5. Зависимость КПД двигателя от мощности

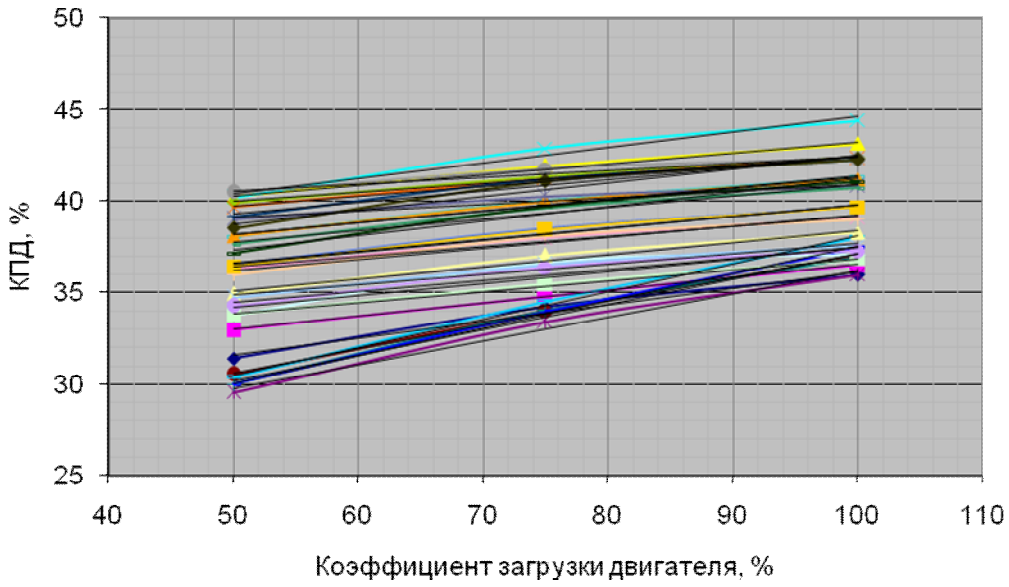


Рис. 6. Зависимость КПД двигателя от загрузки (нижняя кривая соответствует мощности двигателя 150 кВт, верхняя - 2000 кВт)

Данный показатель является наиболее значимым, так как в основном он определяет себестоимость выработки электрической энергии мини-ТЭЦ.

КПД двигателя мини-ТЭЦ зависит от номинальной мощности двигателя и его коэффициента загрузки. Данная зависимость приведена ниже:

$$КПД=23,2+0,128\cdot К_з+0,0039\cdot(К_з\cdot Р_г/100),\ \% \qquad (1)$$

$К_з$ – коэффициент загрузки, %;

$Р_г$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

Зависимость была получена методом множественной нелинейной регрессии. Основные статистические параметры модели приведены ниже:

Доля объясненной вариации = 93,76 %

Стандартное отклонение остатков = 0,78

Стандартизированный b-коэффициент для 1 элемента = 0,92

Натуральный b-коэффициент для 1 элемента = 0,13

Стандартная ошибка натурального b-коэффициента для 1 элемента = 0,009

Стандартизированный b-коэффициент для 2 элемента = 0,30

Натуральный b-коэффициент для 2 элемента = 0,004

Стандартная ошибка натурального b-коэффициента для 2 элемента = 0,0008

Свободный член = 23,20

Удельный расход природного газа, как и КПД двигателя, является определяющим по влиянию на себестоимость выработки электроэнергии.

Часовой расход природного газа (нм^3/ч) рассчитывается по формуле:

$$G_ч = 3600\ Nэ\ /\ (h_э\ H_u),\ нм^3/ч \qquad (2)$$

где $N_э$ - электрическая мощность электроагрегата, кВт;

$h_э$ - электрический КПД электроагрегата;

H_u - низшая теплотворная способность топлива, кДж/м^3 (принято H_u = 33297 кДж / м^3).

Изменение удельного расхода газа из-за изменения КПД при изменении нагрузки мини-ТЭЦ показан на рисунке 7.

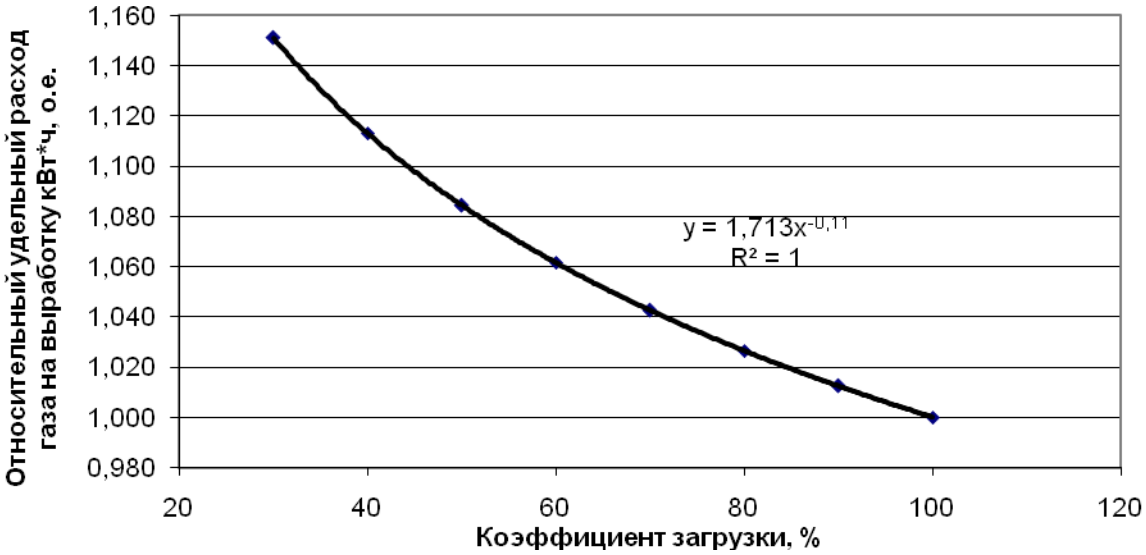


Рис. 7. Изменение удельного расхода газа при изменении нагрузки мини-ТЭЦ

Проведенные экономические расчеты показали, что наиболее затратной статьей при эксплуатации мини-ТЭЦ являются затраты на топливо (природный газ). В таблице 1 приведены эксплуатационные удельные затраты для мини-ТЭЦ мощностью 2 МВт.

Таблица 1

Эксплуатационные удельные затраты на 1 кВт.ч выработанной электроэнергии

Статья затрат	Затраты, руб/кВт·ч
Топливо	0,444
Амортизация	0,016
Горюче-смазочные материалы	0,022
Зарплата обслуживающего персонала	0,03
Ремонтный фонд	0,017
Прочие административные расходы	0,018
Итого	0,547

Из таблицы 1 видно, что при загрузке мини-ТЭЦ на 100% затраты на топливо составляют 81% от суммарных эксплуатационных затрат.

Рассмотрим критерии, определяющие эффективность работы мини-ТЭЦ.

Допустим, что упорядоченный график нагрузки в относительных единицах имеет вид:

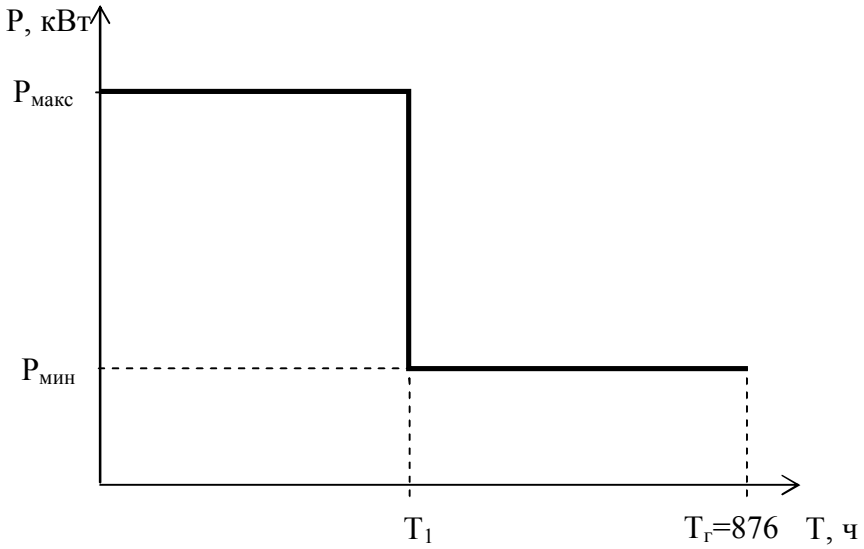


Рис. 9. Упорядоченный график нагрузки в относительных единицах

Принятый двухступенчатый график нагрузки, характерен для узлов нагрузки без крупных промышленных предприятий.

Данный график имеет следующие характеристики:

$$P_{мин} = P_{макс} \cdot \alpha \qquad (3)$$

T_1 - интервал времени максимальной нагрузки, ч:

$$T_1 = \beta \cdot T_г$$

T_2- интервал времени минимальной нагрузки:

$$T_2 = 8760 - T_1 = 8760 - \beta \cdot 8760 = T_г \cdot (1 - \beta) \qquad (4)$$

Годовой объем выработанной электрической энергии:

- в именованных единицах

$$W = (P_{макс} \cdot T_1 + \alpha \cdot P_{макс} \cdot (T_г - T_1)) = P_м \cdot T_г \cdot (\beta + \alpha - \alpha \cdot \beta) \qquad (5)$$

- в относительных единицах

$$W^* = (\beta + \alpha - \alpha \cdot \beta) \qquad (6)$$

Относительный объем выработки электрической энергии генераторами мини-ТЭЦ, рассчитанный по формуле (6) приведен в таблице 2.

Таблица 2

Относительный объем выработки электрической энергии генераторами мини-ТЭЦ

		α									
		0,15	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**
β	**0,1**	0,235	0,28	0,37	0,46	0,55	0,64	0,73	0,82	0,91	1
	0,2	0,32	0,36	0,44	0,52	0,60	0,68	0,76	0,84	0,92	1
	0,3	0,405	0,44	0,51	0,58	0,65	0,72	0,79	0,86	0,93	1
	0,4	0,49	0,52	0,58	0,64	0,70	0,76	0,82	0,88	0,94	1
	0,5	0,575	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1
	0,6	0,66	0,68	0,72	0,76	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1
	0,7	0,745	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1
	0,8	0,83	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1
	0,9	0,915	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1

Величина относительного удельного расхода газа в зависимости от параметров графика нагрузки показана в таблице 3.

Таблица 3

Относительный удельный расход газа в зависимости от параметров графика нагрузки

		α							
		0,3	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**
β	**0,1**	0,411	0,501	0,588	0,673	0,757	0,839	0,920	1
	0,2	0,476	0,556	0,634	0,710	0,784	0,857	0,929	1
	0,3	0,542	0,612	0,680	0,746	0,811	0,875	0,938	1
	0,4	0,607	0,667	0,725	0,782	0,838	0,893	0,947	1
	0,5	0,673	0,723	0,771	0,818	0,865	0,911	0,956	1
	0,6	0,738	0,778	0,817	0,855	0,892	0,928	0,964	1
	0,7	0,804	0,834	0,863	0,891	0,919	0,946	0,973	1
	0,8	0,869	0,889	0,908	0,927	0,946	0,964	0,982	1
	0,9	0,935	0,945	0,954	0,964	0,973	0,982	0,991	1

Работа мини-ТЭЦ с загрузкой менее 100% приводит к снижению доли топливной составляющей и к относительному увеличению других составляющих затрат (амортизация, горюче-смазочные материалы, зарплата обслуживающего персонала, ремонтный фонд, прочие административные расходы), т.е. к относительному увеличению себестоимости выработки электрической энергии.

Доля газа (%) в себестоимости выработки электрической энергии показана в таблице 4 и на рисунке 10.

Таблица 4

Доля газа (%) в себестоимости выработки электрической энергии

		α							
		0,3	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**
β	**0,1**	59,677	64,789	68,750	71,910	74,490	76,636	78,448	80,000
	0,2	63,768	67,532	70,588	73,118	75,248	77,064	78,632	80,000
	0,3	67,105	69,880	72,222	74,227	75,962	77,477	78,814	80,000
	0,4	69,880	71,910	73,684	75,248	76,636	77,876	78,992	80,000
	0,5	72,222	73,684	75,000	76,190	77,273	78,261	79,167	80,000
	0,6	74,227	75,248	76,190	77,064	77,876	78,632	79,339	80,000
	0,7	75,962	76,636	77,273	77,876	78,448	78,992	79,508	80,000
	0,8	77,477	77,876	78,261	78,632	78,992	79,339	79,675	80,000
	0,9	78,814	78,992	79,167	79,339	79,508	79,675	79,839	80,000

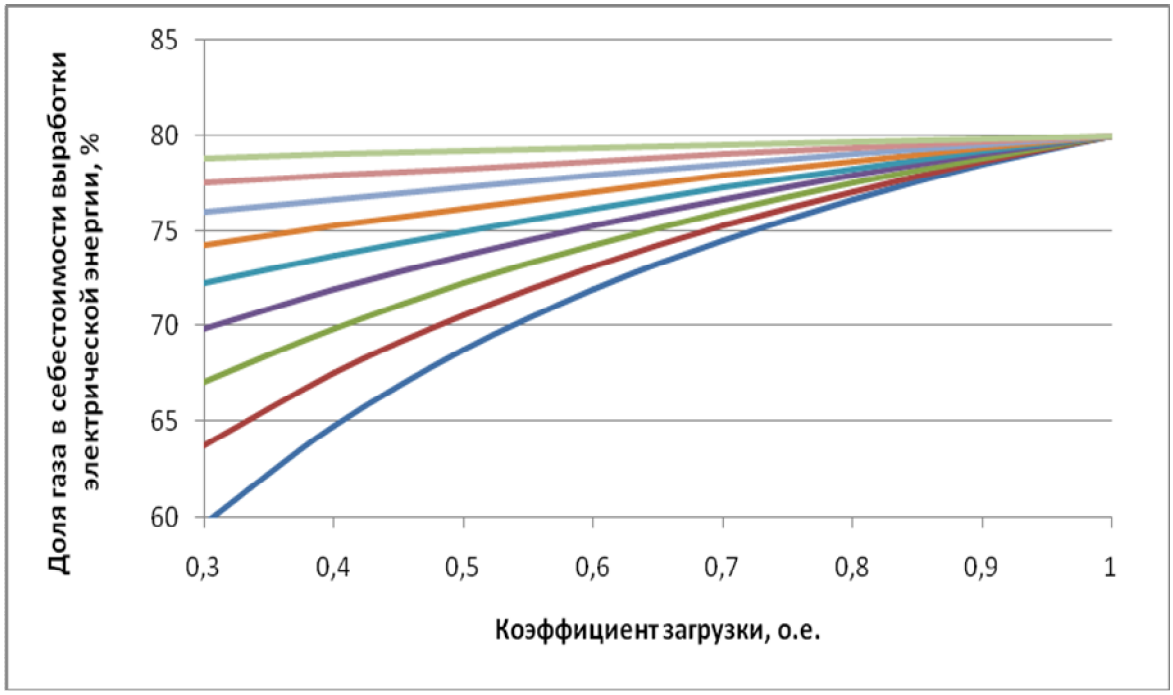


Рис. 10. Доля газа (%) в себестоимости выработки электрической энергии (нижняя кривая - β=0,1, верхняя - β=0,9)

Коэффициент удорожания выработки электрической энергии является величиной обратной доли газа в себестоимости.

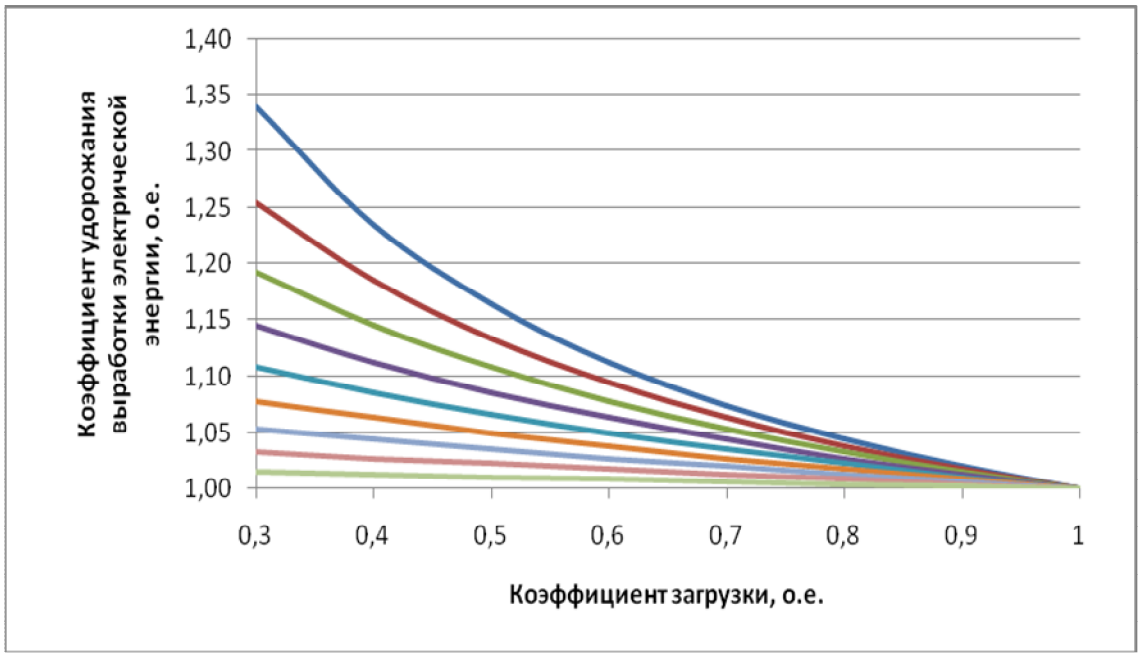


Рис. 11. Коэффициент удорожания выработки электрической энергии (нижняя кривая - β=0,9, верхняя - β=0,1)

Относительное изменение удельного расхода газа ($К_у$), связанного с увеличением удельного расхода при снижении КПД приведено в таблице 5 и на рисунке 12.

Таблица 5

Относительное изменение удельного расхода газа ($К_у$)

		α							
		0,3	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**
β	**0,1**	1,369	1,252	1,176	1,122	1,081	1,049	1,022	1,000
	0,2	1,588	1,390	1,268	1,183	1,120	1,071	1,032	1,000
	0,3	1,806	1,529	1,359	1,243	1,158	1,094	1,042	1,000
	0,4	2,024	1,668	1,451	1,304	1,197	1,116	1,052	1,000
	0,5	2,242	1,807	1,542	1,364	1,236	1,138	1,062	1,000
	0,6	2,460	1,945	1,634	1,425	1,274	1,161	1,072	1,000
	0,7	2,679	2,084	1,725	1,485	1,313	1,183	1,081	1,000
	0,8	2,897	2,223	1,817	1,546	1,351	1,205	1,091	1,000
	0,9	3,115	2,361	1,908	1,606	1,390	1,228	1,101	1,000

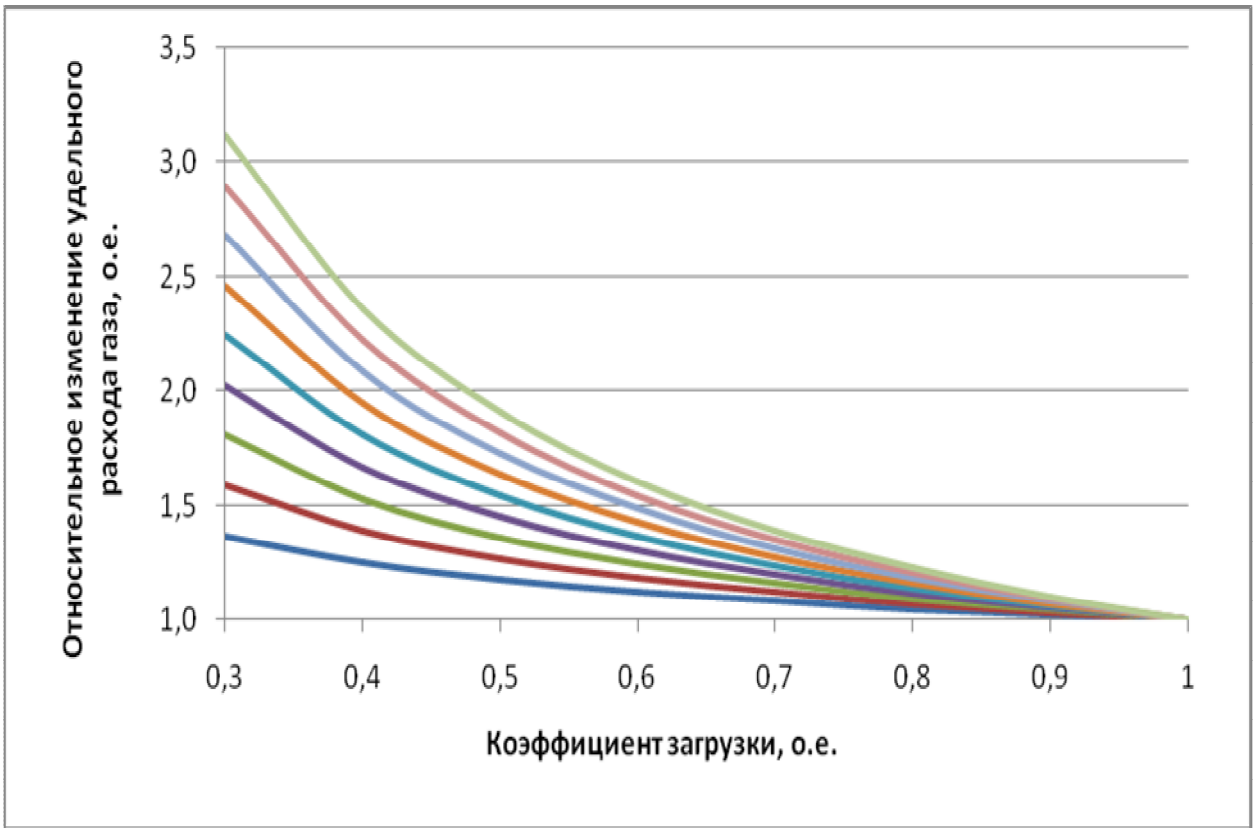


Рис. 12. Относительное изменение удельного расхода газа (нижняя кривая - β=0,1, верхняя - β=0,9)

Затраты (относительные) на выработку электрической энергии оцениваются следующим образом: $К_э = К_{рг} \cdot К_у$

В таблице 6 и на рисунке 13 приведена зависимость коэффициента эффективности от коэффициента загрузки в минимальном режиме и относительной длительности времени максимума.

Таблица 6

Зависимость затрат (относительных) на выработку электрической энергии от коэффициента загрузки в минимальном режиме и относительной длительности времени максимума

		α							
		0,3	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**
β	**0,1**	1,836	1,546	1,368	1,248	1,161	1,095	1,042	1,000
	0,2	1,992	1,647	1,437	1,294	1,190	1,112	1,050	1,000
	0,3	2,153	1,751	1,505	1,340	1,220	1,129	1,058	1,000
	0,4	2,317	1,855	1,575	1,386	1,250	1,146	1,065	1,000
	0,5	2,484	1,961	1,645	1,432	1,279	1,164	1,073	1,000
	0,6	2,652	2,068	1,715	1,479	1,309	1,181	1,081	1,000
	0,7	2,821	2,175	1,786	1,526	1,339	1,198	1,088	1,000
	0,8	2,991	2,283	1,857	1,573	1,369	1,215	1,096	1,000
	0,9	3,162	2,391	1,929	1,620	1,399	1,233	1,103	1,000

Рассмотрим эффективность годовой выработки электрической энергии при одинаковом объеме (W* = 0,7) и разными коэффициентами загрузки генераторов в минимальном режиме (рисунок 14).

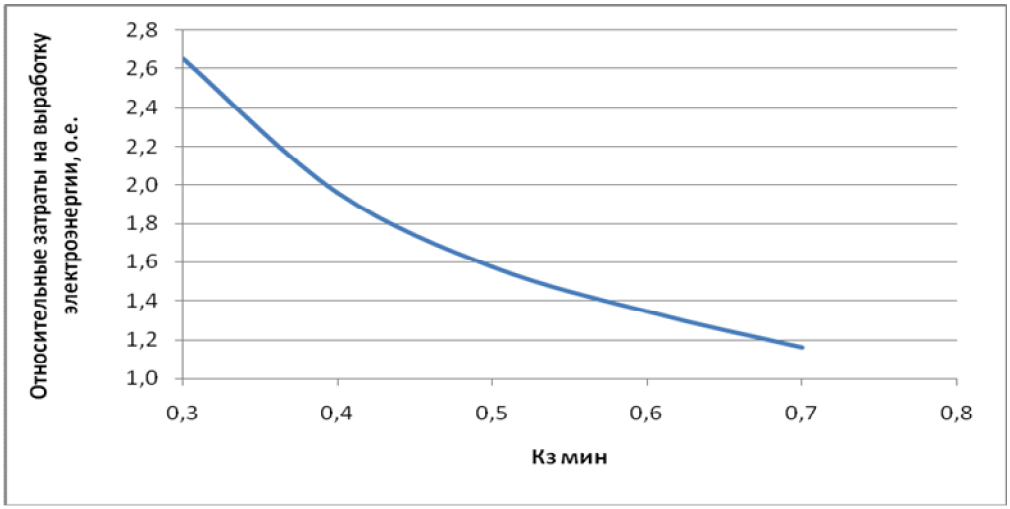


Рис. 14. Эффективная годовая выработка электрической энергии при одинаковом объеме

Рассмотрим автономный режим работы мини-ТЭЦ, так как этот режим является наиболее сложным для анализа. Некоторые проблемы возникают при обеспечении работы генераторов в минимальном режиме нагрузки. Примем, что допустимый $К_з$ в минимальном режиме составлял 30%.

Количество генераторов с резервными, шт.	2	3	4	5	6	7	8
Допустимая минимальная нагрузка, %	30,0	15,0	10,0	7,5	6,0	5,0	4,3
Загрузка генераторов в максимальном режиме, %	50	100	100	100	100	100	100
Максимальная нагрузка, %	100	100	100	100	100	100	100
Мощность генераторов (по отношению к максимальной нагрузке), %	100,0	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	14,3
Количество генераторов в работе, шт.	2	2	3	4	5	6	7

При малых коэффициентах загрузки в минимальном режиме возможны следующие варианты:

1. Увеличение количества генераторов (с одновременным уменьшением единичной мощности);
2. Использование для работы в минимальном режиме отдельный генератор уменьшенной мощности (при этом необходимо иметь резервным генератор такой же мощности).

Проведем анализ изменения удельной стоимости строительства мини-ТЭЦ (о.е.) при изменении количества генераторов при разных величинах нагрузки в минимальном режиме. За базовую мини-ТЭЦ принята мини-ТЭЦ мощностью 2х1000 кВт. Расчеты выполнены для двух вариантов минимальной нагрузки: 5% и 10% от максимальной нагрузки. Для обеспечения выработки электрической энергии в минимальном режиме используются генераторы меньшей мощности.

Рассмотрены следующие варианты:

№ варианта	1	2	3	4	5	6	Минимальная нагрузка
Установленная мощность	2*1000+2*200	3*700+2*200	4*500	5*400	6*350	7*300	10%
Установленная мощность	2*1000+2*100	3*700+2*100	4*500+2*100	5*400+2*100	6*350+2*100	7*300	5%

На рисунке 15 показана зависимость изменения удельной стоимости строительства мини-ТЭЦ (о.е.) при изменении количества генераторов при разных величинах нагрузки в минимальном режиме.

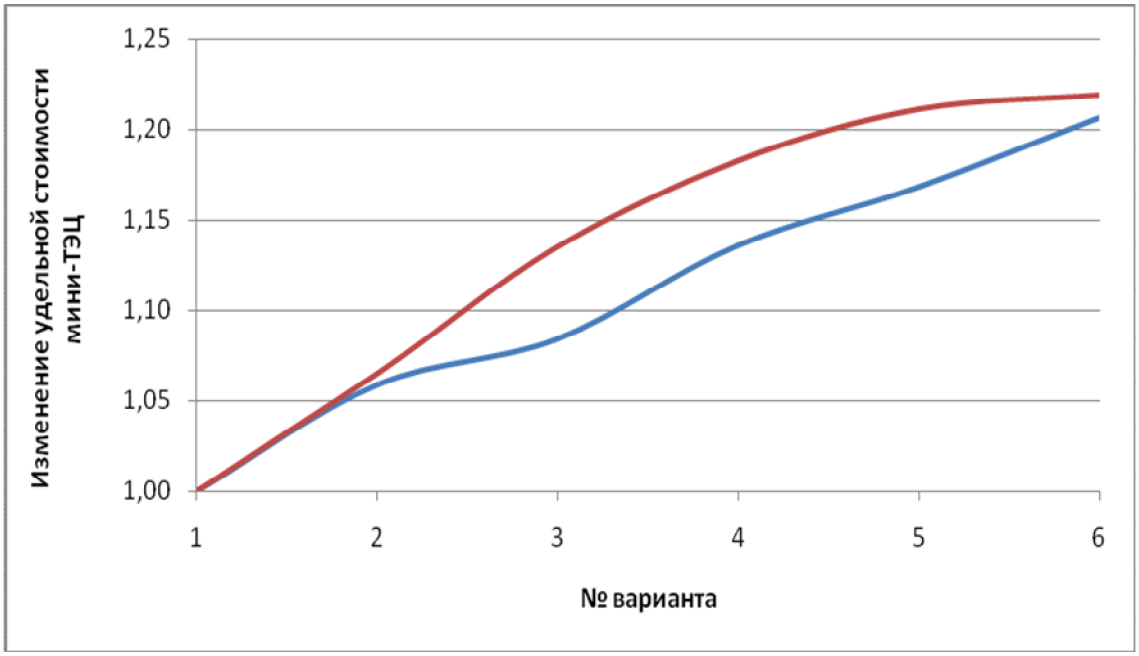


Рис. 15. Зависимость изменения удельной стоимости строительства мини-ТЭЦ (о.е.) при изменении количества генераторов при разных величинах нагрузки в минимальном режиме (Верхний (красный) график - минимальная нагрузка составляет 5% от максимальной, нижний (синий) - 10%)

Рассмотрим относительное изменение потребления топлива на выработку электрической энергии для 1 и 2 вариантов:

1 вариант: 2*1000+2*100 кВт;

2 вариант: 7*300 кВт.

Принято допущение, что при снижении нагрузки часть генераторов отключается. При этом поддерживается максимально возможный коэффициент загрузки генераторов. На рисунке 16 приведены зависимости изменения расхода топлива (%) 1-го варианта по отношению ко 2-му для различных коэффициентов загрузки в минимальном режиме. Экстремумы функций связаны с моментами отключения одного из генераторов.

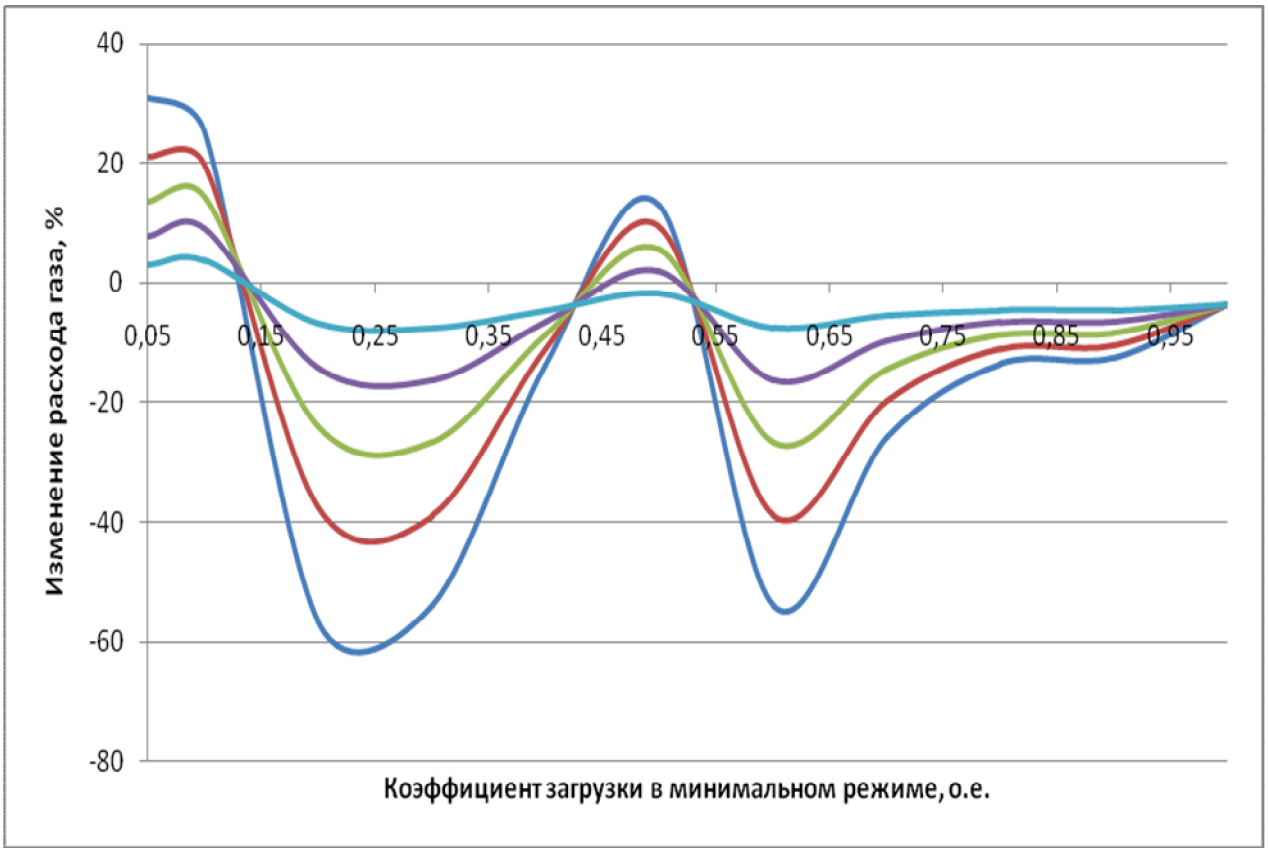


Рис. 16. Зависимость изменения расхода топлива 1-го варианта по отношению ко 2-му (верхний – β=0,1, нижний – β=0,9)

Выводы:

1. Разработанные критерии оценки эффективности выбора количества и мощности мини - ТЭЦ в различных секторах экономики России, позволят повысить надежность их энергоснабжения и в кратчайшие сроки ликвидировать дефицит электроэнергии;

2. Разработанные рекомендации позволят повысить эффективность систем энергоснабжения и снизить себестоимость вырабатываемой электрической энергии при технико-экономическом анализе проектов, а также при разработке бизнес-планов.

УДК 621.3.01

А.И. ГАРДИН, Д.А. КИСЕЛЬ

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Смоделирована часть электросетевого района на лабораторном стенде, произведены измерения тока напряжения мощности в линии и в нагрузке, сняты осциллограммы.

***Ключевые слова*:** электрическая сеть, компенсация реактивной мощности.

Исследование нормальных режимов проводится на лабораторном стенде челябинского производителя «Учебная техника». Моделируется передача электроэнергии от шин низкого напряжения трансформаторной подстанции до потребителей, подключенных к шинам силового пункта. На рис.1 представлена схема электрической сети с различными видами нагрузки. Особенностью сетей низкого напряжения (0,4кВ), выполненных кабельными линиями, является: преобладание в полном сопротивлении ЛЭП величины активного сопротивления над индуктивным сопротивлением. Характерная векторная диаграмма тока и напряжений для случая подключения нагрузки в конце линии и перенесения сопротивления нулевого проводника в прямую ветвь схемы замещения представлена на рис.2 [1].

На лабораторном стенде исследована работа электрической сети со следующими видами подключения нагрузки: однофазная нагрузка, включенная на фазное напряжение, компенсация реактивной мощности однофазной нагрузки включенной на фазное напряжение и смоделирована работа одной фазы нагрузки соединенной в «звезду» (при этом опыте шунтируется сопротивление обратного проводника).

Для моделирования электрической сети использованы следующие модули лабораторного стенда:

- однофазный источник питания ~220 В / 10 А служит для питания функциональных блоков стенда;
- регулируемый автотрансформатор ~0…240 В / 2 А служит для изменения напряжения в сети; два блока мультиметров по два мультиметра 0…1000 В, 0…10 А, 0…20 Мом служат для измерения тока и напряжения в цепи;
- две модели линии электропередачи ~220 В / 0,3 А;
- активная нагрузка ~220 В / 0…30 Вт;
- индуктивная нагрузка ~220 В / 0…30 вар;
- емкостная нагрузка ~220 В / 0…30 вар;
- измеритель мощностей 15; 60; 150; 300; 600 В, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А служит для измерения активной и реактивной мощности в начале и в конце линии;
- персональный компьютер используется в качестве цифрового многоканального осциллографа.

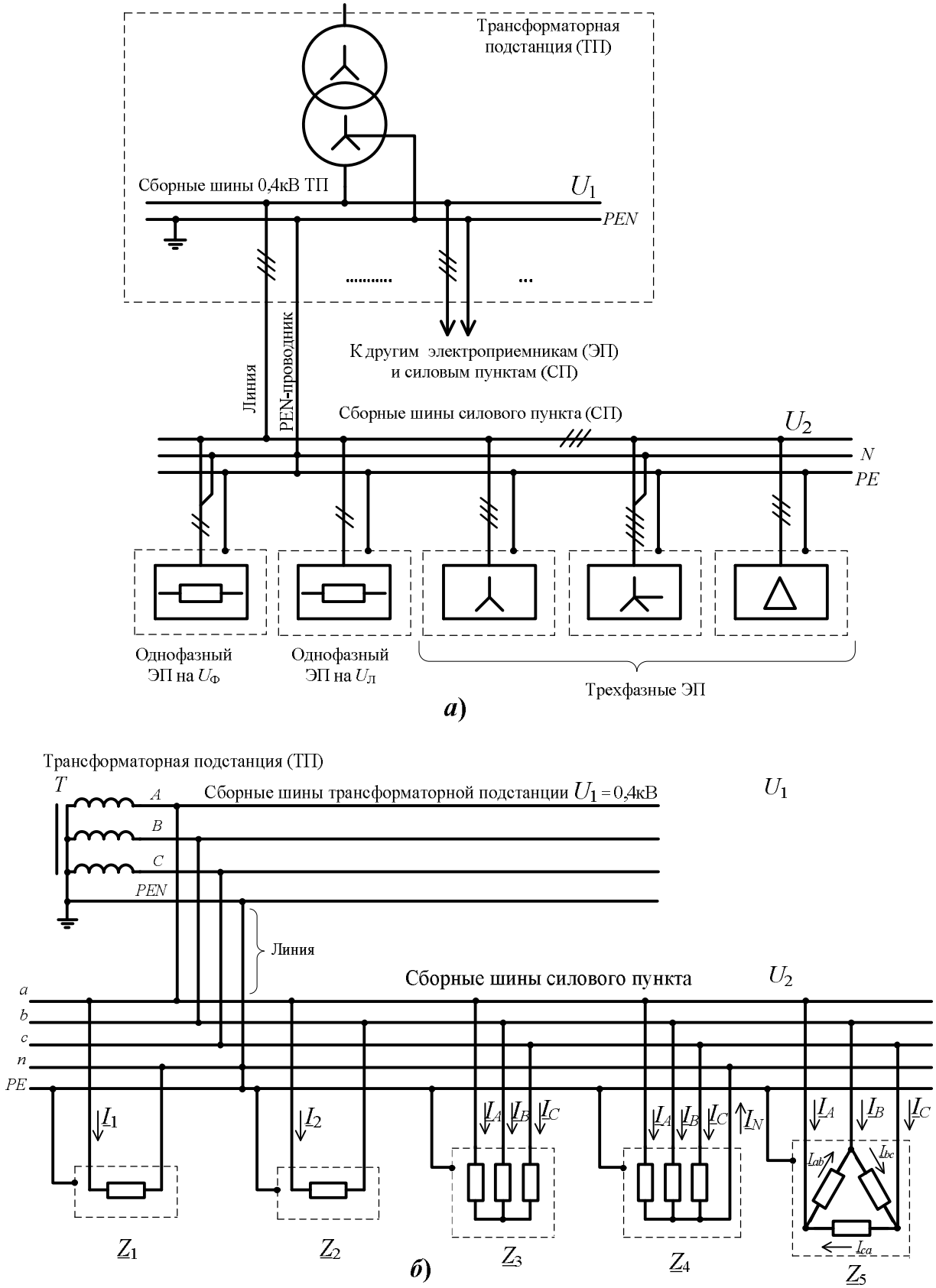


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема электрической сети и подключенные к ней электроприемники:
а) однолинейная схема; *б*) многолинейная схема

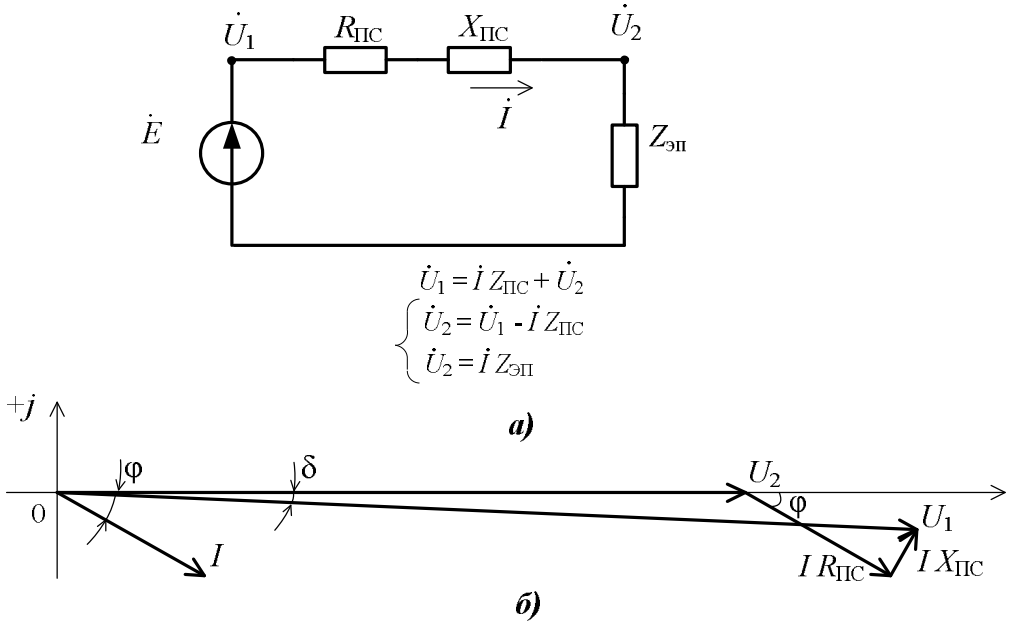


Рис. 2. Векторная диаграмма тока и напряжений линии электрической сети с нагрузкой на конце:
а – электрическая схема замещения; б – векторная диаграмма.

На рис.3 представлена схема модели электрической сети. Ток, напряжение и мощность в начале и конце линии определяются по блоку мультиметров и встроенного измерителя мощностей. Для компенсации реактивной мощности параллельно нагрузке подключается конденсатор, а для моделирования подключения нагрузки по схеме «Звезда» исключается обратная линия.

Результаты одного из экспериментов представлены в таблице 1 и на рис.4.

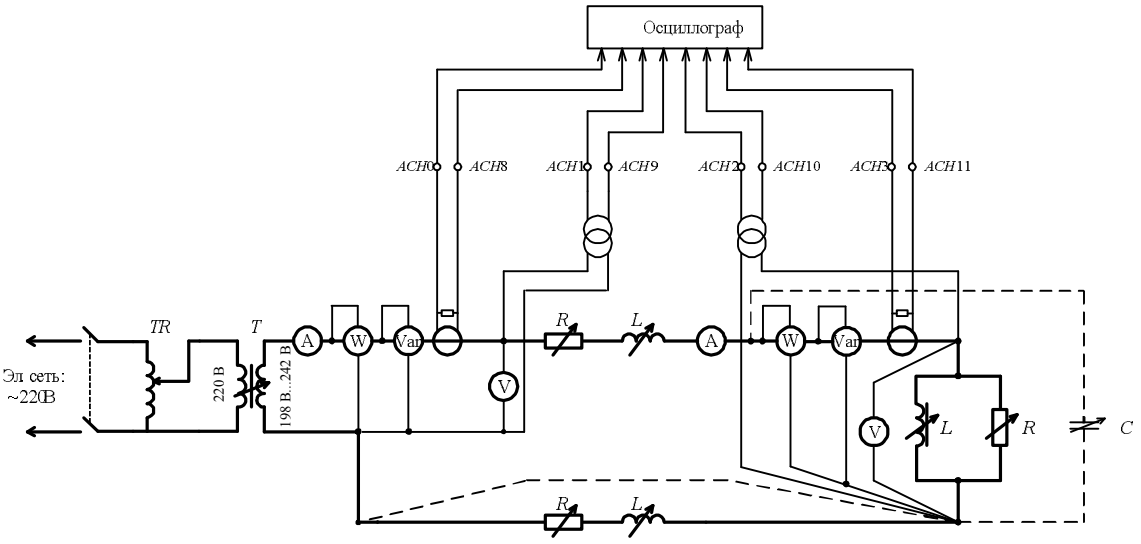


Рис. 3. Принципиальная схема модели электрической сети

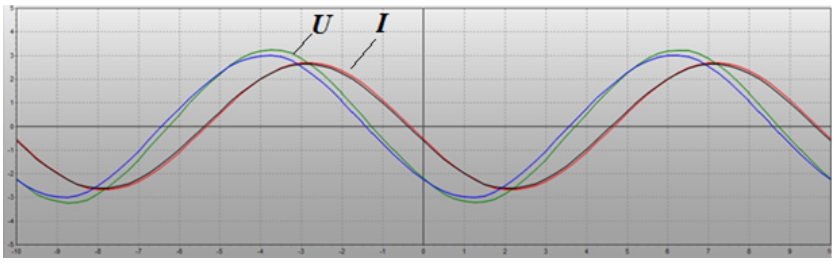
Согласно рис. 4,*а* следует, что напряжение на нагрузке (U_2) опережает напряжение в начале линии (U_1) и меньше этого напряжения на величину потерь напряжения в линии, а ток в начале и конце линии практически не отличаются по величине и фазе и отстают от напряжений. Выше сказанное согласуется с векторной диаграммой (рис. 2, *б*).

Таблица 1

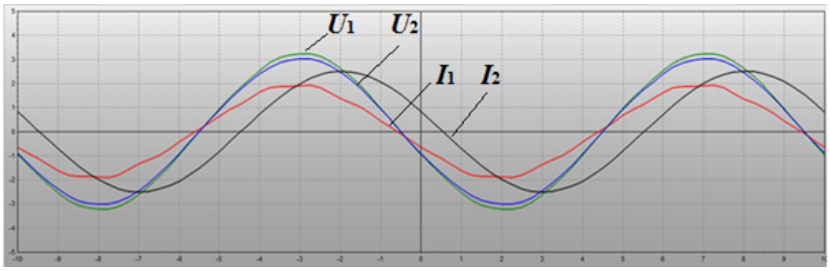
Результаты измерений мощности (активной *W* и реактивной *V*), тока *A* и напряжения *U*

Наименование схемы	Показания ваттметра и варметра				Показания амперметра и вольтметра			
	в начале линии		на нагрузке		в начале линии		на нагрузке	
	W_1, Вт	V_1, вар	W_2, Вт	V_2, вар	A_1, А	U_1, В	A_2, А	U_2, В
Одноф. на $U_ф$	36	24	28	24	0,180	231	0,180	202
Одноф на $U_ф$ с компенсацией	32	0	28	24	0,135	231	0,182	204
«Звезда»	36	28	32	28	0,191	231	0,191	215

После компенсации реактивной мощности (рис. 4,*б*) напряжение на нагрузке (U_2) практически совпадает с напряжением в начале линии (U_1) по фазе и меньше этого напряжения на величину потерь напряжения в линии, а ток в начале в линии (I_1) совпадает по фазе с напряжением (U_1), ток на нагрузке (I_2) отстает по фазе от напряжения (U_2), и становится больше, чем был до компенсации.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения в линии и на нагрузке:
а – нагрузка подключена на фазное напряжение;
б - нагрузка подключена на фазное напряжение при компенсации реактивной мощности.

Осциллограмма токов и напряжений при подключении нагрузки по схеме звезда практически совпадает с рис.4а, однако величина потерь напряжения уменьшается вследствие исключения из электрической цепи обратного проводника.

На рис.5 показан возможный диапазон вольт-амперных характеристик (ВАХ) сети и нагрузки за счет изменения величины их активных и индуктивных сопротивлений. При увеличении сопротивления подводящей сети характеристика сети становится круче. При увеличении мощности нагрузки характеристика нагрузки становится положе. Подробное рассмотрение согласования ВАХ распределительной сети и ВАХ электроприемников рассмотрено в [2].

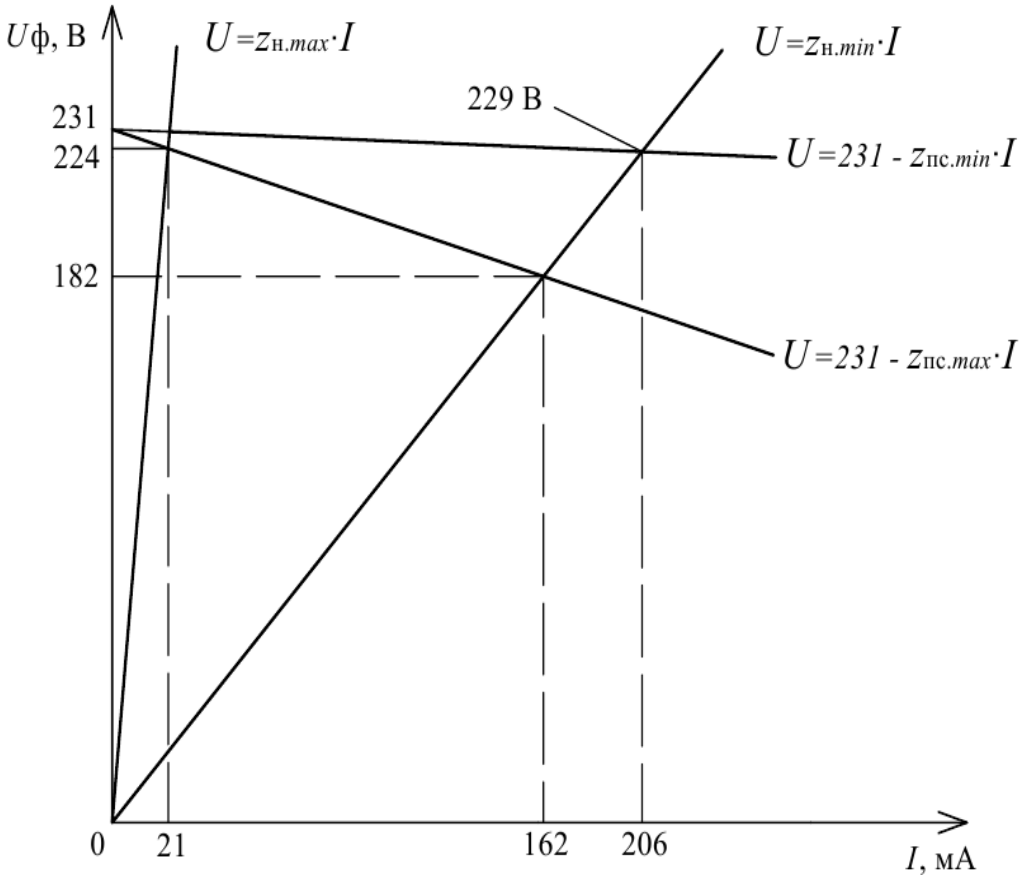


Рис. 5. Диапазон изменения вольт-амперных характеристик сети и нагрузки:
$z_{н.min}$ – минимальное значение полного сопротивления нагрузки, $z_{н.max}$ максимальное значение полного сопротивления нагрузки, $z_{пс.min}$ минимальное значение полного сопротивления подводящей сети, $z_{пс.max}$ максимальное значение полного сопротивления подводящей сети.

Работа на лабораторном стенде позволяет студентам второго курса энергетических специальностей познакомиться с понятием системы электроснабжения, оценить преимущества передачи электроэнергии на трехфазном токе и при условии компенсации реактивной мощности нагрузки.

Библиографический список

1. **Идельчик В. И.** Электрические системы и сети: Учебник для вузов./ В. И. Идельчик .- М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.
2. **Гардин А.И.**. Анализ работы узла нагрузки интеллектуальной распределительной сети, оборудованной трансформаторно-тиристорным регулятором напряжения и мощности с расщепленной первичной обмоткой трансформатора и ключами однонаправленного тока (ТТРНМ ОТ)/ А.И. Гардин, В.В. Груздев, Н.А. Масленников.// Актуальные проблемы электроэнергетики: НГТУ, Н.Новгород, 2011.- с. 130 – 137.

УДК 621.3.01

А.И. ГАРДИН, Д.А. КИСЕЛЬ

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан стенд, обеспечивающий испытание физической модели фазоповоротного устройства в сетях с изолированным и заземленным режимом нейтрали трансформаторов.

***Ключевые слова*:** фазоповоротное устройство, лабораторный стенд.

Характер передачи активной и реактивной мощности по линиям электропередач (ЛЭП) переменного тока между узлами электрической сети зависит от режима нейтрали сети, характера нагрузки (преобладание активной, индуктивной, емкостной - при снятии внешней нагрузки) и параметров ЛЭП. Традиционно фазоповоротные устройства (ФПУ) применяются в сетях 110кВ и выше. Характерными особенностями этих сетей являются: глухое или эффективно заземленный режим работы нейтрали трансформаторов, преобладание в полном сопротивлении ЛЭП величины индуктивного сопротивления над активным сопротивлением. Нагрузка имеет активно-индуктивный характер с коэффициентом мощности около 0,9 и симметрична по фазам сети. Поставлена задача разработать лабораторный стенд для испытания возможности работы ФПУ в сетях среднего и низкого напряжения

В сетях среднего напряжения (6-10-35кВ), выполненных кабельными линиями, характерными особенностями являются: изолированный режим работы нейтрали трансформаторов, преобладание в полном сопротивлении ЛЭП активного сопротивления над индуктивным сопротивлением, наличие зарядных мощностей между фазами, а также фазами и заземленным экраном Нагрузка имеет активно-индуктивный характер с коэффициентом мощности 0,8 - 0,9. и симметрична по фазам сети

В сетях низкого напряжения (0,4кВ), выполненных кабельными линиями, характерными особенностями являются: заземленный режим работы нейтрали трансформаторов, наличие нулевого проводника, обладающего конечным сопротивлением и отличным от сопротивлений фазных проводников, преобладание в полном сопротивлении ЛЭП величины активного сопротивления над индуктивным сопротивлением. Нагрузка имеет активно-индуктивный характер с коэффициентом мощности 0,6-0,9 и несимметрична по фазам сети

Разработан стенд, который обеспечивает испытание физической модели ФПУ в сетях с изолированным и заземленным режимом нейтрали трансформаторов. Физическая модель ЛЭП способна изменять величину и соотношение активного и индуктивного сопротивления в полном продольном сопротивлении и регулировать поперечные емкостные проводимости. Физическая модель электрической нагрузки обеспечивает возможность регулирования с различной степенью неравномерности по фазам электрической сети, а также с различным характером этой нагрузки. Предусмотрено две линии для проверки способности ФПУ перераспределять транспортные потоки между ними в условиях различного сочетания нагрузки и соотношения активного и индуктивного сопротивления ЛЭП для различных режимов работы нейтрали трансформаторов.

Стенд обеспечивает измерение токов, напряжений, полной активной и реактивной мощности и угловых сдвигов между токами и напряжением в каждой фазе сети, между напряжениями в начале и конце линии, а также в точках электрической сети до и после включения ФПУ. Так как ФПУ выполнено на основе нелинейных полупроводниковых элементов с различными способами регулирования напряжения, то контролируются показатели качества электроэнергии в начале и конце линии, на нагрузке, а также в точках электрической сети до и после включения ФПУ.

Лабораторный стенд представляет собой комплекс, состоящий из отдельных функциональных модулей, размещенных на металлической раме. Часть модулей представляет собой физические модели элементов электрической сети среднего и низкого напряжения, другая часть служит для измерения тока, напряжения и мощности (действующие и мгновенные значения) при различных режимах работы сети под действием управляющего воздействия ФПУ. Выключатели позволяют изменять конфигурацию физической модели электрической сети. Линейный автотрансформатор, измерительные приборы являются готовыми покупными изделиями.

На рис.1 изображена функциональная схема стенда, на рис.2 изображена схема соединений силовых модулей физических моделей элементов электрической сети.

Модуль А1 является источником питания стенда. Его назначение состоит в том, чтобы обеспечивать питанием трехфазным и однофазным переменным током промышленной частоты функциональных блоков лабораторного стенда.

Модуль А2 является лабораторным автотрансформатором (ЛАТР). Он предназначен для плавного регулирования напряжения переменного тока 50Гц и моделирует изменение напряжения в электрической сети.

Модуль А3 представляет собой линейный реактор, который необходим для ограничения токов короткого замыкания после ЛАТРа.

Модули А4 представляют собой трехполюсный выключатель и предназначены для коммутации силовых электрических цепей лабораторного стенда (включение стенда для проведения очередного эксперимента, подключение параллельной ЛЭП, шунтирование ФПУ).

Модули А5 представляют собой комплекты измерительных приборов, включающие амперметры, вольтметры ваттметры и переключатели, позволяющие замерить ток, напряжение, мощность в каждой фазе сети.

Модули А6 представляют собой трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, аналоговые сигналы с которых поступают на коннектор, преобразуются в цифровой сигнал и поступают на «Многоканальный осциллограф».

Модуль А7 является физической моделью ФПУ, которая подвергается испытаниям.

Модули А8 представляют собой физическую модель ЛЭП и позволяют моделировать различные величины и соотношения активного и индуктивного продольных сопротивлений, а также емкостных проводимостей, характерных как для воздушных, так и кабельных ЛЭП.

Модули А9, А10, А11 представляют собой физические модели активной, индуктивной и емкостной нагрузки. Они позволяют проверить работоспособность ФПУ при их различном сочетании.

Модули А12 представляют собой приборы для измерения показателей качества электроэнергии модели типа «Ресурс ПКЭ 1.5».

Модуль А13 представляет собой панель переключения ваттметра и варметра, позволяющая измерять активную и реактивную мощность в каждой фазе сети одним комплектом измерительных приборов. Одновременно вольтметр показывает величину напряжения в измеряемой фазе.

Модуль А14 представляет собой физическую модель трехфазной трансформаторной группы. Он предназначен для моделирования сетей среднего напряжения с изолированной нейтралью, а также является вторым источником питания при изучении работы ФПУ в замкнутых электрических сетях.

На лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований физических моделей устройства регулирования потоков мощности разработана эскизная конструкторская документация, состоящая из функциональных, принципиальных схем, схем соединений (подключений) и спецификаций по каждому модулю.

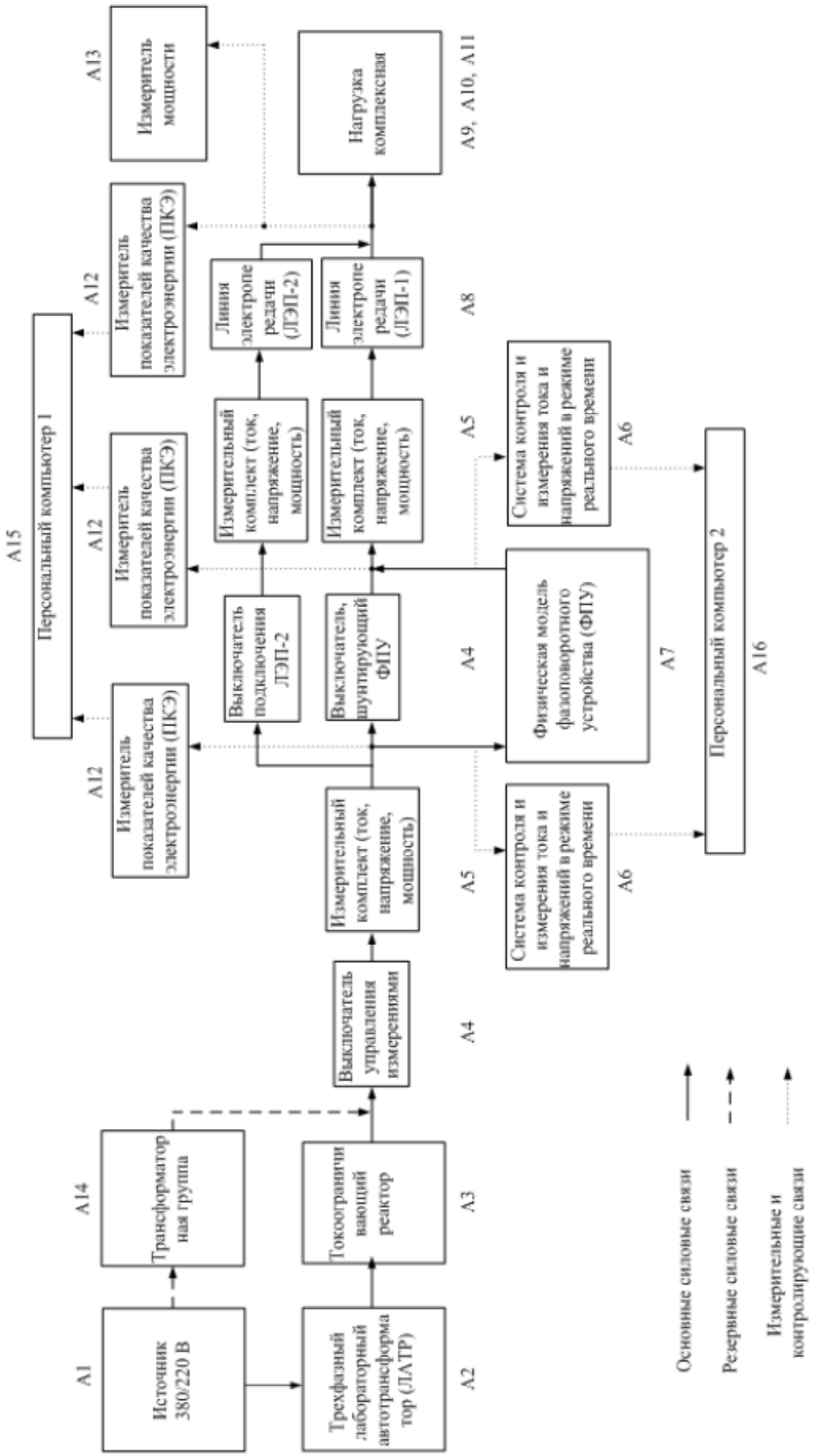


Рис. 1. Функциональная схема лабораторного стенда

Мом

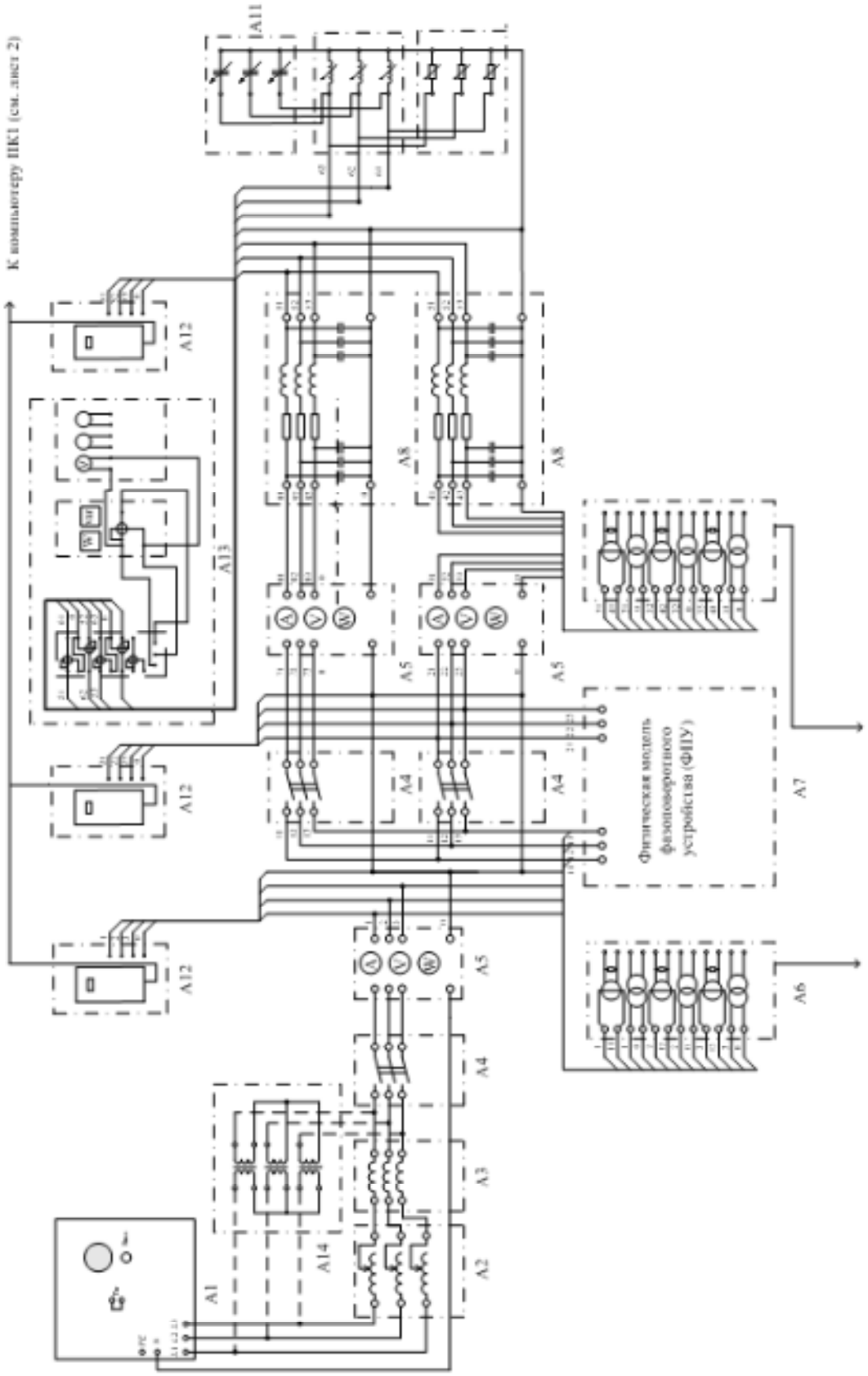


Рис. 2. Схема соединений модулей лабораторного стенда

УДК 621.31

Л.В. ДУДНИКОВА, Е.Б. СОЛНЦЕВ, А.М. МАМОНОВ, А.А. СЕВОСТЬЯНОВ

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ВНЕДРЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ, ИМЕЮЩЕГО МАРКИРОВКУ В БЫТОВОМ СЕКТОРЕ, БЮДЖЕТНОМ СЕКТОРЕ И НА ДРУГИХ ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ (ЗДАНИЯХ)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Целью работы является анализ региональных законодательных и нормативных документов по направлению энергосбережения и эффективного использования энергии и подготовка предложений по разработке новых документов, которые обеспечивали бы скорейшее внедрение маркировки энергоэффективности в пилотном регионе (Нижегородская область) для следующих видов оборудования: водяные насосы; промышленные кондиционеры; холодильные установки для центральных систем кондиционирования воздуха; бытовые холодильники, морозильники; бытовые стиральные машины. Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки России, ПРООН/ГЭФ 00070781 «Стандарты и маркировка для продвижения энергоэффективности в Российской Федерации».

***Ключевые слова*:** энергоэффективность оборудования, маркировка энергоэффективности.

В Нижегородской области реализуется большая номенклатура импортного инженерного оборудования зданий и бытовых электроприборов, которые имеют обязательную маркировку энергетической эффективности, предусмотренную в законодательстве зарубежных государств. Так как Российская Федерация в значительной мере отстает от многих других стран в вопросах эффективности использования энергии, то все острее встает вопрос о заинтересованности и стимулировании более широкого использования энергоэффективных приборов и оборудования.

В соответствии с федеральным законом от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ, которое наряду с другими требованиями, устанавливает требования по энергоэффективности оборудования, зданий и сооружений, а также, подзаконными актами, включая постановление Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2009 года №1222, которым определены виды товаров, информация о классе энергетической эффективности которых должна содержаться в технической документации, прилагаемой к этим товарам, в их маркировке, на их этикетках, одним из важных критериев для решения задачи повышения эффективности использования энергии является маркировка энергоэффективности зданий и их инженерного оборудования.

Использование инструмента маркировки энергетической эффективности инженерного оборудования позволит более качественно сформулировать мероприятия для повышения энергетической эффективности различных объектов.

Проведенный анализ показал, что по состоянию на текущий момент маркировка энергоэффективности энергопотребляющего оборудования применяется более чем в 50 странах мира. Наиболее значительные достижения в области энергетической эффективности имеются у стран Европейского союза. Слабым звеном в цепи законодательных и нормативных правовых актов в области внедрения маркировки энергетической эффективности бытовых энергопотребляющих устройств и инженерного оборудования зданий остаются регионы РФ, включая Нижегородскую область.

Директива 92/75/ЕС, принятая ЕС в 1992 году касательно маркировки и стандартной информации по потреблению энергии или других ресурсов бытовыми приборами, предусматривает разделение всех однородных бытовых электрических приборов на 7 классов энергоэффективности (A, B, C,D,E,F,G). Согласно требованиям директивы наиболее энергоэффективным является класс A, а самым энергозатратным является класс G.

В 2010 году вышла новая директива 2010/31/ЕС по маркировке энергетической эффективности, которая расширяет сферу регулирования на промышленные и торговые приборы и оборудование. Введено 3 новых класса энергоэффективности A+, A++, A+++. Если продукция имеет высший класс энергоэффективности (A+++), то низшие классы (E-G) из этикетки для такой продукции исключаются.

Проведенный анализ существующего положения и практики использования маркировки энергетической эффективности с внедрением маркировки энергетической эффективности бытовых энергопотребляющих устройств и инженерного оборудования зданий, в том числе и при госзакупках в Нижегородской области, показал, что основные положения и требования федерального законодательства по энергосбережению и повышению энергетической эффективности Правительством Нижегородской области соблюдаются. Выявлено, что в Нижегородской области не производится оборудование, требующее применения маркировки энергоэффективности. Использование маркировки энергетической эффективности при закупках бюджетными учреждениями не производится в связи с отсутствием специальных требований в региональных документах.

Оценка активности рынка продажи и количества находящихся приборов в эксплуатации в Нижегородской области до настоящего времени не производилась. Расчет среднегодового роста активности рынка продажи и количества находящихся приборов в эксплуатации выполнен ориентировочно на основе данных по материалам электронных баз исследования независимыми экспертами (DISCOVERY Research Group, GFK и др.).

Известно, что наряду с ростом платежеспособности населения, приобретающего бытовые электроприборы, одним из критериев активности рынка является рост численности населения. Поэтому, анализ активности рынка бытовых электроприборов Нижегородской области проводится методом расчета натуральных объемов фактической реализации в предыдущие годы.

Для расчета среднегодового роста активности рынка продажи электроприборов и инженерного оборудования зданий в Нижегородской

области в качестве исходных данных приняты сводные данные по России. Количество проданных и находящихся в эксплуатации электроприборов в Нижегородской области определено с использованием доли численности населения Нижегородской области в общей численности населения России. Расчет может быть представлен следующим выражением:

$$N= [(m_{НО} : m_{РФ/М}) \times n],$$

где N – количество проданных в Нижегородской области электроприборов (или находящихся в эксплуатации холодильников, стиральных машин, насосов, вентиляторов и других видов электропотребляющего оборудования), $m_{НО}$ – численность населения Нижегородской области, $m_{РФ/М}$ – численность населения России или г.Москвы, n – количество проданных в России или в Москве электроприборов.

Аналогично выполняется ориентировочный расчет по определению находящихся в эксплуатации холодильников, стиральных машин, насосов, вентиляторов и других видов приборов оборудования потребляющих электроэнергию.

Расчет среднегодового роста активности рынка продажи и количества приборов находящихся в эксплуатации ориентировочно выполнен сравнением данных о проданных и эксплуатируемых приборах и оборудовании в России и представлен по Нижегородской области за 2009-2012 годы в качестве базовых для последующих расчетов по оценке потенциала внедрения.

Расчетные объемы в качестве базовых показателей для оценки потенциала внедрения оборудования имеющего маркировку в бытовом секторе, бюджетном секторе и на других объектах энергопотребления (зданиях) Нижегородской области представлены в табл. 1.

Предполагаемый рост активности рынка продажи и количества бытовых приборов находящихся в эксплуатации ориентировочно со среднегодовым ростом 8-10% выполнен по Нижегородской области путем сравнения данных о проданных и эксплуатируемых приборах и оборудовании в России, Москве и представлен в табл. 2 – 5.

Таблица 3

Динамика активности рынка бытовых электроприборов в Нижегородской области в прошлые годы

Показатели	2009	2010	2011	2012
Кол-во проданных электроприборов (млн. штук)	1,21	1,33	1,47	1,61
Количество холодильников в эксплуатации, млн. штук	1,46	1,60	1,76	1,94
Количество стиральных машин в эксплуатации, млн штук	1,05	1,13	1,23	1,32

Таблица 4

Рост* активности применения бытовых электроприборов в Нижегородской области на период до 2020 года

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Объем реализации всех бытовых электроприборов (млрд. руб.)	14,6	16,0	17,6	19,4	21,3	23,5
Кол-во проданных электроприборов (млн. штук)	2,15	2,36	2,60	2,86	3,15	3,46

* – 10% среднегодовой рост

Таблица 5

Рост* активности применения холодильников в Нижегородской области на период до 2020 года

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Объем реализации, млрд. руб.	3,6	4,0	4,4	4,8	5,3	5,8
Количество холодильников в эксплуатации, млн. штук	2,58	2,84	3,12	3,44	3,78	4,16
Среднегодовое** потребление электроэнергии в расчете на один холодильник, кВт*ч	476	462	448	435	422	409

* – 10% среднегодовой рост при обеспеченности домохозяйств 97%
** – 3% годовое снижение

Годовая экономия электроэнергии выбранными бытовыми электроприборами и инженерным оборудованием зданий с учетом анализа роста/снижения ежегодной активности, рассчитана ориентировочно путем сравнения данных по России, Москве на период до 2030 года и представлена по Нижегородской области в таблице 6.

Таблица 6

Рост* активности применения стиральных машин в Нижегородской области на период до 2020 года

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Объем реализации, млрд.руб.	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3
Количество электроприборов в эксплуатации, млн штук	1,67	1,80	1,94	2,10	2,27	2,45
Среднегодовое потребление электроэнергии в расчете на один электроприбор, кВт*ч	147	142	138	134	130	126

* – 8 % среднегодовой рост при обеспеченности домохозяйств 60-70%

При условии формирования региональных нормативных правовых актов по энергосбережению с учетом соответствия федеральному законодательству и в порядке предлагаемом в настоящей работе, их применение в Нижегородской области может обеспечить суммарное сокращение эмиссии CO_2 к 2030 году до 9,562 Мт к уровню 2000 года [1-3]. Расчетные объемы эмиссии на период до 2030 г. по Нижегородской области представлены в таблице 7.

Таблица 7

Рост* активности применения насосов, вентиляторов и холодильных установок, используемых в центральных системах кондиционирования воздуха по Нижегородской области на период до 2020 года

Показатели, (тыс. штук)	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**
Насосы	199	219	241	265	291	320
Вентиляторы	23,4	25,7	28,3	31,1	34,2	37,7
Холодильные установки для систем кондиционирования воздуха						
Установки малой мощности (до 50 кВт)	1,33	1,46	1,60	1,76	1,94	2,13
Установки большой мощности (свыше 50 кВт)	0,33	0,36	0,40	0,44	0,48	0,53
Всего	**1,66**	**1,82**	**2,00**	**2,20**	**2,42**	**2,67**

Таблица 8

Годовая экономия электроэнергии выбранными бытовыми электроприборами и инженерным оборудованием зданий по Нижегородской области на период до 2030 г.

Прибор/оборудование (млрд. кВтч)	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**
Холодильники/морозильники	0,039	0,097	0,122	0,144
Бытовые стиральные машины	0,017	0,019	0,030	0,039
Итого по бытовым электроприборам	0,055	0,116	0,152	0,182
Насосы	0,296	0,614	1,075	1,382
Промышленные кондиционеры и вентиляторы	0,053	0,105	0,155	0,207
Холодильные установки для систем центрального кондиционирования	0,028	0,039	0,041	0,041
Итого по инженерному оборудованию зданий	0,376	0,757	1,271	1,630
Всего по выбранным бытовым электроприборам и инженерному оборудованию зданий	0,431	0,873	1,423	1,813

Таблица 9

Сокращение эмиссии CO_2 в результате экономии электроэнергии выбранными бытовыми электроприборами и инженерным оборудованием зданий по Нижегородской области на период до 2030 г.

Прибор/оборудование (Мт CO_2)	2015	2020	2025	2030
Холодильники/морозильники	0,019	0,047	0,061	0,072
Бытовые стиральные машины	0,008	0,011	0,014	0,019
Насосы	0,149	0,307	0,539	0,691
Промышленные кондиционеры и вентиляторы	0,025	0,053	0,077	0,105
Холодильные установки для систем центрального кондиционирования	0,014	0,019	0,022	0,022
Доля Нижегородской области общем годовом сокращении эмиссии в России	0,065	0,062	0,061	0,060
Суммарное сокращение эмиссии CO2 (2000 – 2030)	0,652	2,368	5,389	9,562

Заключение

Резкое удорожание энергоносителей, проявившееся в относительном давлении энергии на издержки конечных потребителей, вывело энергетические затраты в фактор стратегических резервов в повышении эффективности производства регионального продукта.

В современных условиях цены на энергоносители негативным образом влияют на уровень издержек конечных потребителей. Доля энергетических затрат в стоимости промышленной продукции региона продолжает увеличиваться, что создает экономические стимулы к энергосбережению.

Важной составляющей для снижения уровня издержек конечных потребителей энергии является фактор, заложенный законодательством в полномочия субъектов Российской Федерации, предусмотренных в ст.7 Закона № 261-ФЗ, а именно:

1) разработка и реализация региональных и муниципальных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

2) информационное обеспечение на территории соответствующего субъекта Российской Федерации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, определенных в качестве обязательных федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации, а также предусмотренных региональной программой в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Данная задача является перспективной и может быть достигнута путем поэтапного внедрения стандартов и маркировки энергоэффективности с

одновременным созданием и распространением институциональной, правовой и нормативной базы для содействия внедрению и широкому распространению систем стандартизации и маркировки энергоэффективности за счет осведомленности и улучшения доступа населения и организаций к объективной информации об энергоэффективности приоритетных видов электроприборов.

При условии достижения поставленных задач в Нижегородской области, возможно снижение потребления электроэнергии за счет внедрения оборудования имеющего маркировку в бытовом секторе, бюджетном секторе и на других объектах энергопотребления (зданиях) на перспективу до 2030 года в объеме 1,813 млрд. кВт.ч и снижении выбросов CO_2 к уровню 2000 года на 2,368 Мт в 2020 г. и на 9,562 Мт в 2030 г.

Библиографический список

1. Сайт Проекта Минобрнауки Российской Федерации/ПРООН/ГЭФ (http://www.label-ee.ru/) .
2. Сайт Института маркетинговых исследований ГфК-Русь (http://www.gfk.ru/).
3. Проектный документ ПРООН «Стандарты и маркировка для продвижения энергоэффективности в Российской Федерации.
4. Проект регламента Таможенного союза "Об информировании потребителя об энергетической эффективности электрических энергопотребляющих устройств".
5. **Сеппанен О.** Требования к энергоэффективности в странах ЕС. - Энергосбережение, 2010, №7.
6. Наумов А.Л. Энергоэффективность инженерного оборудования. - ЭСКО, 2013, №5.
7. **Наумов А.Л.** Классификация энергоэффективности. – Журнал «Энергосбережение», 2011, № 2.
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года».
9. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 июня 2010 г. № 1047-р «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2009 г. № 1830-р «О плане мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации, направленных на реализацию Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

УДК 621.3

Ю.М. МАКАРОВА, А.А. МАСЛОВА, В.Л.ОСОКИН

СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Нижегородский государственный инженерно-экономический институт

Предложено устройство, которое за счет солнечной энергии позволяет сократить потребление электроэнергии при производстве сельскохозяйственной продукции. Конструкция устройства содержит теплообменник комбинированного типа. Устройство работает по замкнутому циклу.

***Ключевые слова*:** повышение энергоэффективности, энергосбережение, солнечная энергия, теплообменник комбинированного типа.

Значительную долю в потреблении сельским хозяйством энергоресурсов, занимает электрическая энергия. Это связано с высокой энергоемкостью производства. Поэтому сельскохозяйственные предприятия имеют свои собственные питающие трансформаторные подстанции.

В качестве примера на рисунке 1 представлена диаграмма соотношения потребления электрической энергии группами электроприемников с/х предприятий.

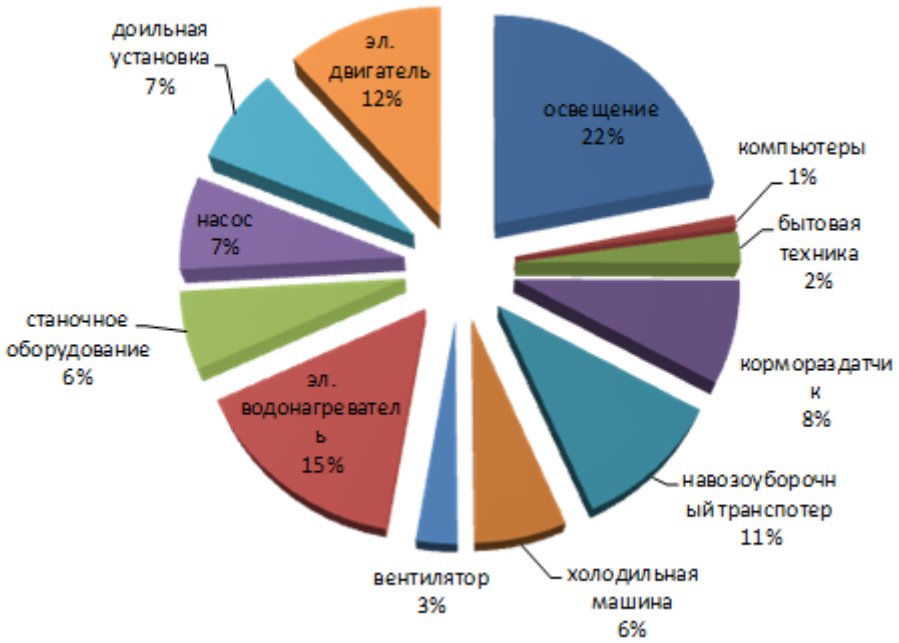


Рис. 1. Распределение потребления электрической энергии по группам электроприемников в с/х предприятиях

Анализируя рисунок 1 можно отметить, что большую часть электрической энергии потребляет освещение (22 %) и электрические водонагреватели (15 %).

Сельское хозяйство, для повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, неизбежно сталкивается с необходимостью модернизации ключевой целью, которой является снижение энергоёмкости.

Повышение энергоэффективности и грамотная организация энергосбережения позволяют существенно сократить энергозатраты на единицу получаемой сельхозпродукции. К тому же потенциал энергосбережения в сельском хозяйстве огромен.

Направлениями энергосбережения в этой области является использование первичных и вторичных источников энергии. В качестве первичного источника предлагается использовать солнечную энергию, а вторичного источника - тепловую энергию, производимую животными.

Устройство, которое за счет использования солнечной энергии призвано сэкономить электрическую энергию, представлено на рисунке 2.

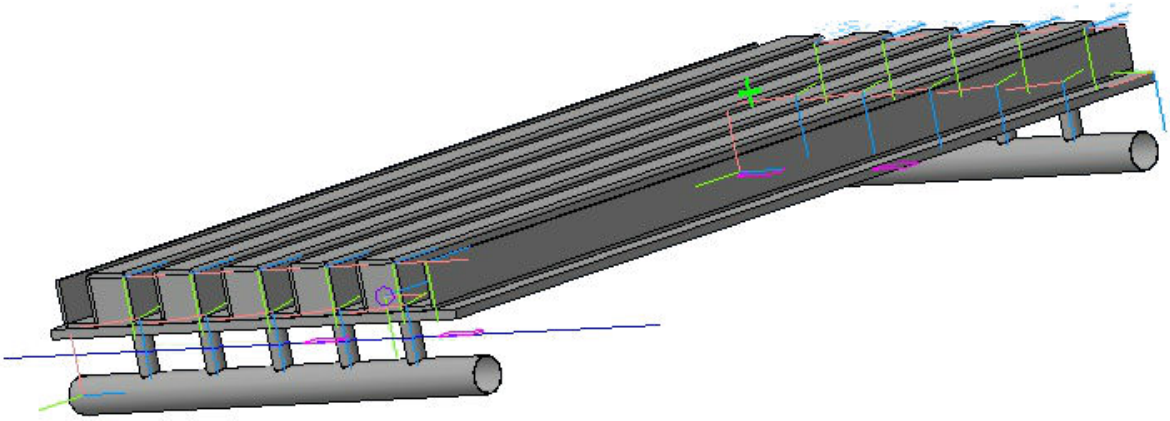


Рис. 2. Установка для подогрева воды за счет использования солнечной энергии

Данная установка предназначена для проектирования на крышах зданий и сооружений животноводческих помещений. Она расположена под наклоном, за счет чего теплота солнечной энергии увеличивает свое воздействие на ее поверхность. Устройство изготавливается из плоского металлического листа, профилированного стального листа и труб разных диаметров.

Верхняя и нижняя часть изготавливается из труб. К нижней части из системы водоснабжения подводится жидкость и через соответствующие ребра в установке, расположенные в торцевых частях она греется.

Скорость потока в ребрах установки мала, течение ламинарное. Установка собирается плоского железного листа и профнастила без уплотняющих элементов, т.е. устройство выполняется неразборным. Герметичность нагревателя воды в целом обеспечивается или сваркой, или пайкой краев пластин.

Вода из системы водоснабжения при помощи насоса подается в теплообменник. Далее холодная вода под давлением поднимается по установке, расположенной под наклоном, в процессе чего она нагревается от теплоты стенок. В дальнейшем уже нагретая вода может непосредственно поступать к потребителям.

Устройство, предназначенное для утилизации тепла животных, представлено на рисунках3 - 4.

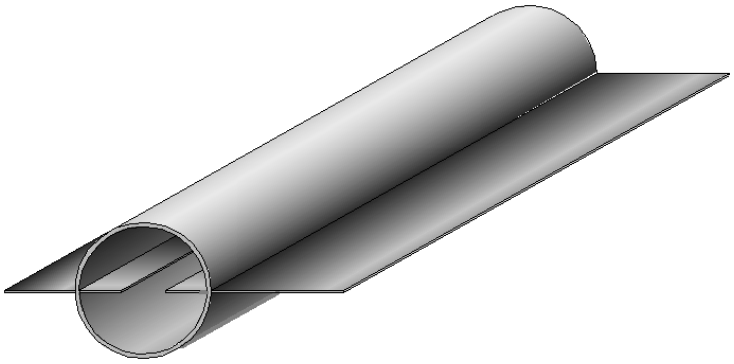
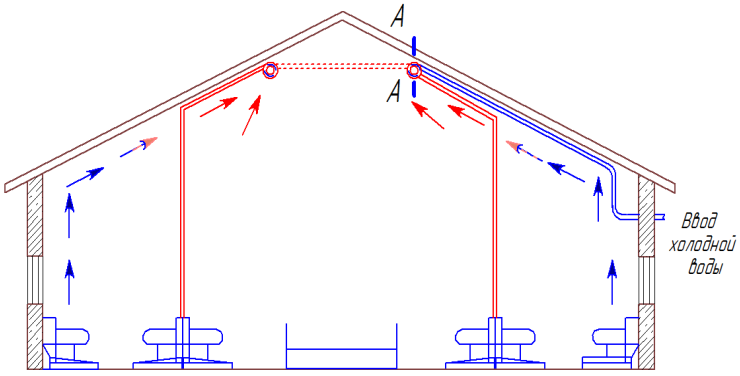
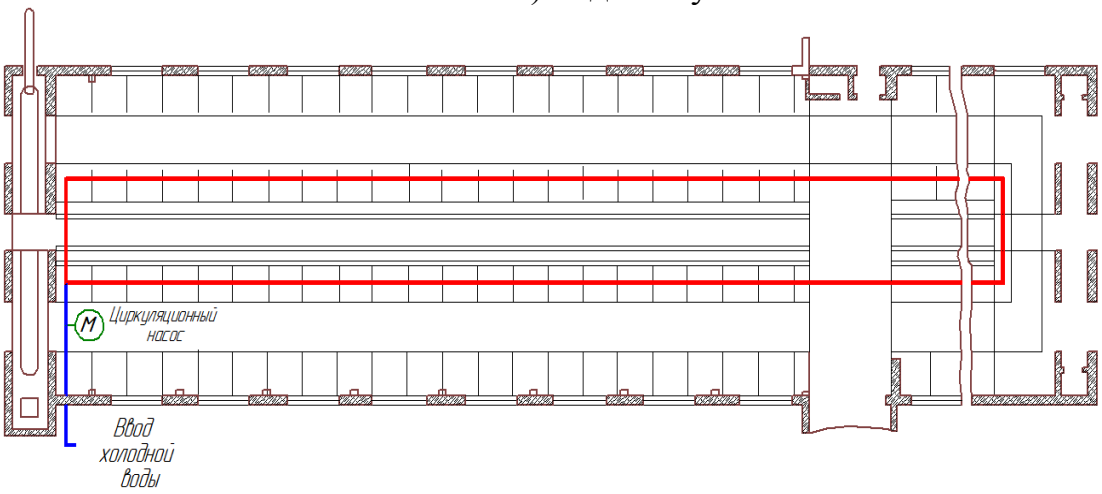


Рис. 3. Участок трубы теплообменника в разрезе



а) вид сбоку



б) вид сверху

Рис. 4. Технологическая схема размещения теплообменника в животноводческом помещении КРС на 200 голов

Это теплообменник комбинированного типа, который выполнен из стальной нержавеющей трубы с оребрением (рис.2).

Конструкция устройства имеет замкнутый цикл, в котором циркуляцию воды осуществляет водяной циркуляционный насос (рис.3). Производимая животными тепловая энергия, поднимаясь вверх, будет взаимодействовать с конструкцией теплообменника. Вода, через ввод, подается в устройство, заполняя его. Для того что бы обеспечить наибольший и ускоренный нагрев, а так же не допустить простоя воды, в теплообменнике осуществляется циркуляция воды с помощью водяного насоса. Вода, подаваемая в устройство, будет нагреваться и поступать в поилки уже подогретая. Регулировка ее количества в устройстве будет производиться с помощью клапана.

Внедрение теплообменника комбинированного типа в систему водоподготовки в животноводческих помещениях для содержания КРС приведет:

- сокращению потребления электрической энергии, за счет модернизации системы водоподготовки;
- уменьшению себестоимости производства молока.

Такие же результаты ожидаются и от использования установки для подогрева воды с помощью солнечной энергии.

В настоящее время оба устройства находятся в стадии сборки макета животноводческого помещения, в котором они будут размещены и заявлены как полезные модели на выдачу патента.

Библиографический список

1. http://energia.3dn.ru/publ/energosberejenie/ehnergosberezhenie_v_selskom_khozjajstve_predposylki/2-1-0-16

УДК 621.311

К.С. АВЕРЬЯНОВА, Н.В. БЕЗМЕНОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ В КРУ - 6(10) КВ

Самарский государственный технический университет

Вопрос электромагнитной совместимости в комплектных распределительных устройствах, а именно влияние напряженности магнитного поля на устройства микропроцессорной релейной защиты мало изучены. Для оценки этого влияния принята геометрическая модель расположения шин распределительного устройства и разработан метод расчета для отдельных шин с токами и суммарных значений напряженностей магнитного поля.

***Ключевые слова*:** электромагнитная совместимость, напряженность магнитного поля промышленной частоты, комплектное распределительное устройство, микропроцессорная релейная защита.

Из всех видов электромагнитных помех на подстанциях проблема ограничения напряженности магнитного поля (МП) промышленной частоты (ПЧ), особенно, в комплектных распределительных устройствах (КРУ) в связи с ограниченным расстоянием между "источниками" магнитных полей, т.е. между шинами с большими значениями номинальных трехфазных токов 630…3150 А и "приемниками", т.е. устройствами микропроцессорной релейной защиты (МПРЗ), является актуальной, хотя и мало изученной.

Особенностью данной проблемы является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в соответствии с классом электромагнитной обстановки (ЭМО), в первую очередь, по требованиям ГОСТ Р 51317.6.5-2006 [1] к помехоустойчивости на физической границе (порт корпуса) технических устройств (ТУ), составляющим, в частности, для непрерывного магнитного поля промышленной частоты на уровне: $H_{норм}$= 100 А/м, а для ряда ТУ, например, для микропроцессорного устройства дистанционной защиты "Сириус-ДЗ-35", на уровне: $H_{норм}$ = 30 А/м [2]. Исследования [3] показали, что несоблюдение условий электромагнитной совместимости (ЭМС) по магнитным полям промышленной частоты (50 Гц) в РУ, является серьезной причиной нарушений (до 9%) в работе вторичных ТУ распределительных подстанций.

Решением проблемы выполнения требований ЭМС по допустимым значениям напряженности магнитного поля промышленной частоты является обеспечение достаточного расстояния между шинами с рабочими токами и корпусом технического устройства.

В ячейках КРУ напряжением 6…10 кВ, как показано на рис. 1, шины с рабочими токами, как правило, расположены вертикально, расстояния между центрами шин составляет, примерно, 0,2 м, а расстояние между шинами и горизонтальной плоскостью расположения корпусов микропроцессорной релейной защиты (МПРЗ) составляет 0,4…0,6 м.

Для определения напряженностей МППЧ в окружающем трехфазные шины пространстве, принимаются мгновенные значения симметричных трехфазных токов $i = \dot{I}_m \sin(\omega t - \varphi)$ с учетом фазовых сдвигов, обусловленных характером нагрузки электрической сети (ЭС), основным из которых является режим симметричных токов. В представленной на рис. 1 геометрической модели, шины с рабочими токами расположены по оси *x* в точках А, В, С, на расстоянии *d* друг от друга. Контрольные точки *a, b, c*, располагаются напротив шин с токами по оси параллельной оси *x*.

Для принятой геометрической модели, разработан метод расчета для отдельных шин с токами и суммарных (результирующих) значений напряженностей МППЧ, определяемых по выражениям:

$$\dot{H}_{i,A} = \dot{H}_{i,A,эл}(\dot{I}_A; R_{i,A,эл}) \cdot \cos\varphi_{a,A,эл,пр},$$

$$\dot{H}_{i,B} = \dot{H}_{i,B,эл}(\dot{I}_B; R_{i,B,эл}) \cdot \cos\varphi_{b,B,эл,пр},$$

$$\dot{H}_{i,C} = \dot{H}_{i,C,эл}(\dot{I}_C; R_{i,C,эл}) \cdot \cos\varphi_{c,C,эл,пр},$$

$$\dot{H}_{i,\Sigma} = \dot{H}_{i,A} + \dot{H}_{i,B} + \dot{H}_{i,C},$$

где $\dot{I}_A$; $\dot{I}_B$; $\dot{I}_C$ - токи в шинах *A, B, C*; $R_{i,A,эл}$; $R_{i,B,эл}$; $R_{i,C,эл}$ - расстояние между центрами шин *A; B; C* и контрольной точкой *i*; $\dot{H}_{i,A,эл}$; $\dot{H}_{i,B,эл}$; $\dot{H}_{i,C,эл}$ - напряженность МППЧ от тока шин *A; B; C* в контрольной точке *i*, определяемая по выражению для эллипса поперечного сечения шины относительно перпендикулярной оси расположения шин с учетом плоскости стороны шины; $cos\varphi_{a,A,эл,пр}$; $cos\varphi_{b,B,эл,пр}$; $cos\varphi_{c,C,эл,пр}$ - коэффициент приведения напряженности магнитного поля, определяемой в плоскости перпендикулярной векторам $R_{i,A,эл}$; $R_{i,B,эл}$; $R_{i,C,эл}$ к плоскости ее проекции на ось контрольной точки *i*.

При этом целесообразным является приведение полученных значений напряженности МППЧ от трехфазных шин разнесенных друг от друга на определенное расстояние, к плоскости, параллельной расположению шин через $cos\varphi_{i,эл,пр}$, т.е. к плоскости расположения ТС (корпуса предполагаемого устройства МПРЗ).

Характер изменения мгновенных значений напряженностей МППЧ от трехфазных симметричных токов в плоскости, параллельной расположению прямоугольных шин в контрольной точке *a* для периода *t* = 0,02 с, показан на рис. 2.

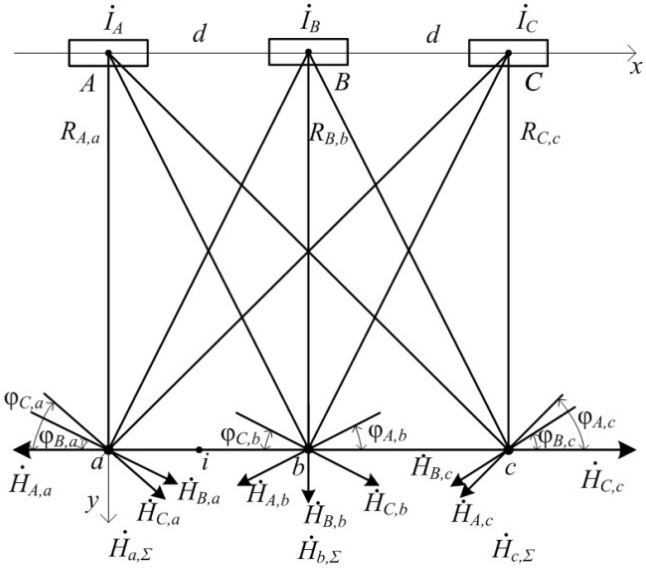


Рис. 1. Геометрическая модель расположения шин, направленных к плоскости контрольных точек *a, b, c* широкой стороной *h*

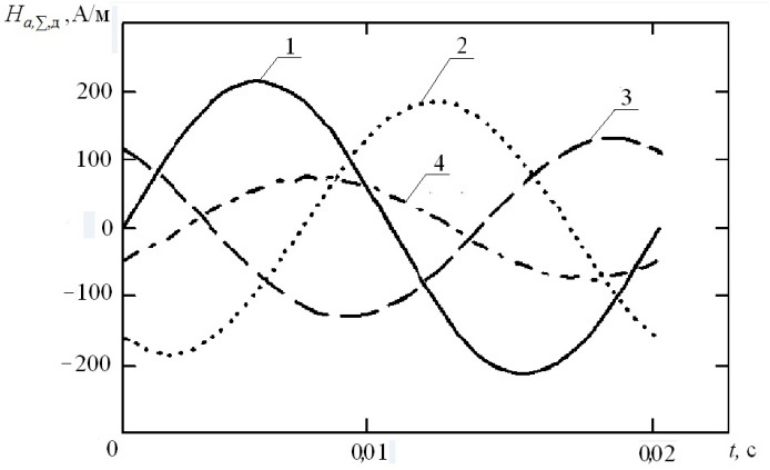


Рис. 2. Осциллограммы напряженностей МППЧ:

1 – $H_{A,a}$, 2 – $H_{B,a}$, 3 – $H_{C,a}$, 4 - $H_{a,\sum}$

Графическая модель изменения напряженности от трехфазной системы шин с симметричными токами приведена на рис.3. При этом, из рис. 3 и 4 следует, что наибольшие значения напряженности МППЧ наблюдаются напротив крайних фаз *A* и *C*, а наименьшие напротив фазы *B*, где является целесообразным установка устройства МПРЗ.

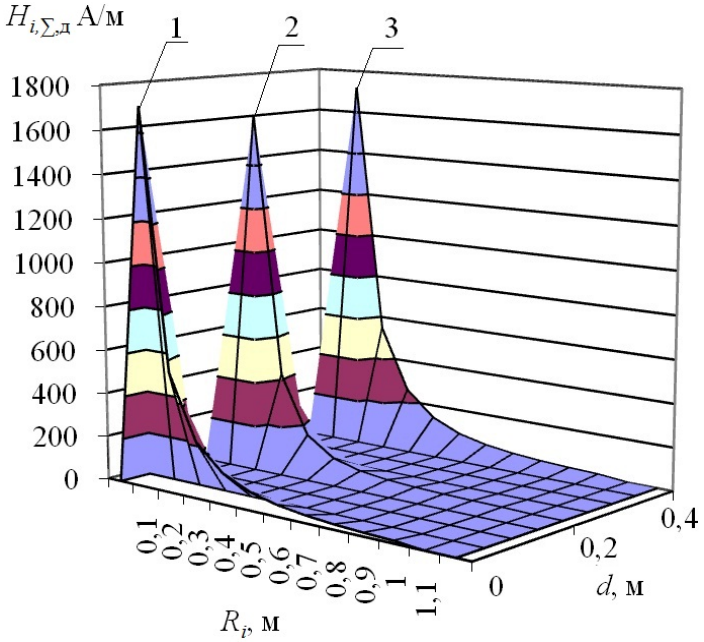


Рис. 3. Графическая модель изменения суммарной напряженностей МППЧ от симметричных трехфазных токов:

1 – от фазы *A*, 2 – от фазы *B*, 3 – от фазы *C*

В целом, значения суммарных напряженностей МППЧ $H_{h,A,\Sigma,\partial}$ от симметричных токов при любых расстояниях d между шинами (от широкой стороны) для наибольших значений (напротив крайних шин) могут быть определены по выражению:

$$H_{h,a,\Sigma,\partial} \cong \frac{I \cdot 0{,}074(\ln R_{A,a} + 3{,}7 \cdot d - 0{,}29)}{R_{A,a}^{1,4}},$$

где $R_{A,a}$ - расстояние от контрольной точки напротив крайней шины до центра прямоугольной шины по оси ее широкой стороны h, d - расстояние между центрами трехфазных шин.

Дополнительно были проведены исследования влияния расстояния между шинами на изменение суммарной напряженности МППЧ. В результате было получено, что при увеличении расстояния между шинами напряженность МППЧ увеличивается, в пределе приближаясь к напряженности МППЧ от одиночного проводника.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 (МЭК 61000-6-5:2001). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 26 с.
2. Устройство микропроцессорной защиты трансформатора «Сириус - Т»: Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. М.: ЗАО «Радиус Автоматика», 2005.
3. **Фещенко В.А.** Решение проблемы ЭМС в ОАО "ФСК ЕЭС". Энергоэксперт. – М.: 2008, № 5(10). С. 68–71.

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.313.3

О.С. ХВАТОВ, И.А. ТАРПАНОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУДОВОЙ ЕДИНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Волжская государственная академия водного транспорта

В статье представлено описание функциональной и структурной схем судовой единой электроэнергетической установки, в состав которой входят: дизель – генератор переменной частоты вращения и пропульсивная гибридная установка. Рассмотрены результаты моделирования различных режимов работы.

Ключевые слова: электроэнергетическая установка, дизель – генератор, асинхронный генератор, машина двойного питания, пропульсивная гибридная установка.

В статье представлено описание функциональной и структурной схем судовой единой электроэнергетической установки, в состав которой входят дизель – генератор переменной частоты вращения и пропульсивная гибридная установка. Рассмотрены результаты моделирования различных режимов работы.

Ключевые слова: единая электроэнергетическая установка, дизель – генератор, асинхронный генератор, машина двойного питания, пропульсивная гибридная установка.

При проектировании судов широкое распространение получила концепция создания судовой единой электроэнергетической установки, от которой получают питание все потребители электроэнергии, в том числе гребные электродвигатели. Применение единой электроэнергетической установки позволяет повысить надежность и упростить обслуживание энергосистемы судна за счет уменьшения количества составляющих ее компонентов [1]. Для повышения экономичности в составе установки целесообразно применение дизель – генератора (ДГ), работающего с переменной скоростью вращения [2]. Экономия топлива достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной скорости вращения вала приводного двигателя, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива. Кроме того, в состав единой энергетической установки может быть включена пропульсивная гибридная установка (ПГУ). Судно с ПГУ сочетает в себе достоинство с пропульсивной установкой с тепловым двигателем и достоинство с пропульсивной установкой с электро-

движением. В этом случае гребной электродвигатель выступает в роли не основной, а вспомогательной пропульсивной установки. Функциональная схема предлагаемой единой энергетической установки судна представлена на рис. 1. В состав входят электрическая часть ПГУ, которая выполнена на основе машины двойного питания (МДП), дизель – генератор переменной частоты вращения, на основе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Для исследования единой электроэнергетической установки судна в различных режимах работы разработана ее математическая модель. В качестве генератора, в составе ДГ переменной частоты вращения, используется асинхронная машина с короткозамкнутым ротором. В качестве гребного электродвигателя в составе ПГУ, используется машина двойного питания. Нагрузкой для ПГУ является гребной винт.

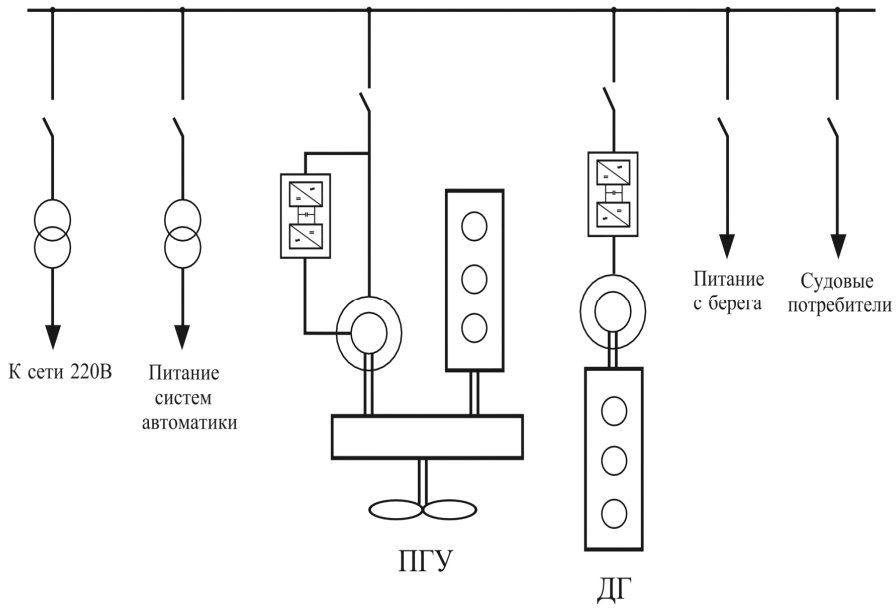


Рис. 1. Принципиальная схема единой электроэнергетической установки

Математическая модель асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором при работе в автономном режиме может быть выполнена на базе уравнений, записанных в системе синхронно вращающихся координат.

Система уравнений, учитывающая изменение как параметров двигателя внутреннего сгорания, так и генератора при изменении электрической нагрузки, запишется в виде [3,4]:

$$\left\{\begin{array}{l} T\dfrac{dy_0}{dt} = x_0 - \mu; \\ U_1 = r(1+T_S's)i_{Sx} - \omega_1 L_S' i_{Sy} - \dfrac{k_R}{T_R}\psi_{Rx} - k_R p\omega_m \psi_{Ry}; \\ 0 = r(1+T_S's)i_{Sy} + \omega_1 L_S' i_{Sx} - \dfrac{k_R}{T_R}\psi_{Ry} - k_R p\omega_m \psi_{Rx}; \\ 0 = -k_R R_R i_{Sx} + \dfrac{1}{T_R}\psi_{Rx} + s\psi_{Rx} - (p\omega_m - \omega_1)\psi_{Ry}; \\ 0 = -k_R R_R i_{Sy} + \dfrac{1}{T_R}\psi_{Ry} + s\psi_{Ry} - (p\omega_m - \omega_1)\psi_{Rx}; \\ m = K_R(\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{sx}) + Js\omega_m. \end{array}\right\} \quad (1)$$

Систему уравнений для описания асинхронного двигателя с фазным ротором, записанную в единой системе координат, вращающейся с произвольной скоростью, можно представить в виде:

$$\left\{\begin{aligned}
&U_{Rx} = r(1+T'_R p)i_{Rx} - (\omega_K - p\omega_m)L'_R i_{Ry} - \frac{k_S}{T_S}\psi_{Sx};\\
&U_{Ry} = r(1+T'_R s)i_{Ry} + (\omega_K - p\omega_m)L'_R i_{Rx} - k_S p\omega_m \psi_{Sx};\\
&U_{Sx} = -k_S R_S i_{Rx} + \frac{1}{T_S}\psi_{Sx} + p\psi_{Sx};\\
&U_{Sy} = -k_S R_S i_{Ry} + \omega_K \psi_{Sx};\\
&m = K_R \psi_{Sx} i_{Ry};\\
&Jp\omega_m = M - M_H.
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Угловая скорость вращения системы координат:

$$\omega_K = \frac{k_S R_S i_{Ry} + U_{Sy}}{\psi_{Sx}}.$$

Учитывая, что в случае гребного винта определенной геометрической формы и при постоянной скорости набегающего потока величины упора и вращающего момента зависят только от рода жидкости, в которой работает винт, от линейных размеров винта и от скорости его вращения, можно считать, что [5]:

$$M = K_2 \rho n^2 D^5 \qquad (3)$$

Где D – диаметр винта; ρ - плотность воды; n – скорость вращения винта; K_2 –коэффициент момента винта.

На основе уравнений 1-3 в пакете Matlab Simulink разработана имитационная модель (рис.2). Модель построена в системе относительных единиц и позволяет анализировать различные режимы работы единой электроэнергетической установки, а также осуществлять синтез регуляторов системы автоматического управления. Исследования проведены на примере ПГУ мощностью 160 кВт, мощность ДГ - 600 кВт.

Исследованы процессы плавного пуска асинхронного двигателя, отключения и подключения нагрузки на двигатель, когда винт оголяется при переходе судна через волну.

Анализ результатов показал, что при достижении винтом частоты вращения примерно $0.5\omega_H$, момент сопротивления на валу МДП достигает номинального значения.

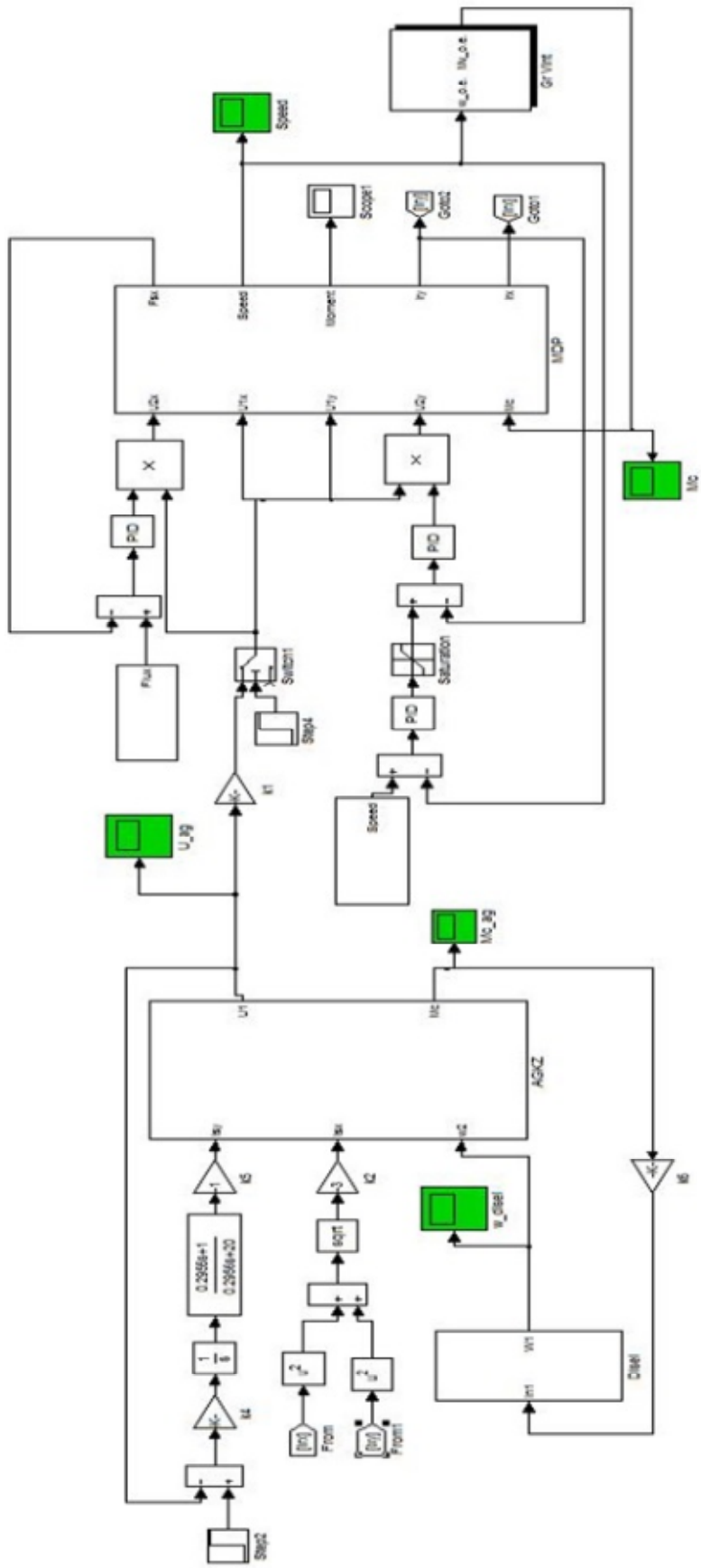


Рис 2 Модель единой электроэнергетической установки с ПГУ на основе МДП

Изменение нагрузки на валу ПГУ (когда винт периодически оголяется при переходе судна через волну) сопровождается отклонением скорости вращения винта в пределах (2÷2,5)%.

Библиографический список

1. **Самоявчев И.С., Хватов О.С., Дарьенков А.Б.** Единая электростанция автономного объекта на базе ДВС переменной частоты вращения: тез. докл. IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. / НГТУ. – Н.Новгород, 2010.
2. **Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М.** Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. – 2010.
3. **Герман-Галкин С.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – СПб.: Корона принт, 2001.
4. **Левин М. И.** Автоматизация дизель – генераторных установок. – М. – Л.: Машгиз, 1963.

УДК 621.314

Р.В. КОЛОСОВ, Г.М. МИРЯСОВ, В.Г. ТИТОВ, И.В. ХОДЫКИНА

ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С ДВУМЯ ДРОССЕЛЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматриваются функциональные особенности преобразователя напряжения с двумя повышающими дросселями, а также построенная имитационная модель преобразователя. Проведены исследования, показывающие её функциональную завершенность и возможность использования для дальнейших исследований режимов работы и влияния различных аварийных процессов.

Ключевые слова: преобразователь, моделирование, эффективность.

Особенностью схемы с двумя повышающими дросселями является возможность получить сигнал на выходе с частотой, вдвое большей частоты коммутации транзисторов [1]. Преобразователь с двумя дросселями предполагается использовать для ветроэнергетической установки (ВЭУ).

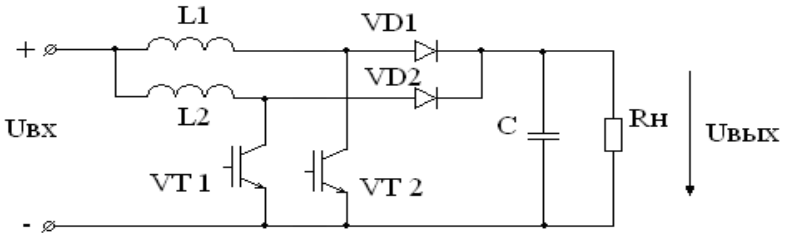


Рис.1. Схема импульсного преобразователя напряжения с двумя повышающими дросселями

Дроссели L1 и L2 равной индуктивности. Средний ток через каждый из дросселей будет равен половине входного тока, в отличие от обратноходового широтно – импульсного преобразователя (ШИП) с одним накапливающим дросселем. Транзисторы VT1 и VT2 получают управляющие импульсы со сдвигом относительно друг друга.

Рассчитаем мощность на выходе преобразователя при различных величинах входного напряжения, изменяющегося от 50..150 В, поддерживая на выходе постоянную величину напряжения 200 В.

Численные значения элементов схемы:

- индуктивность L1= L2=L=100 мГн,
- ёмкость конденсатора С=50 мкФ,
- сопротивление нагрузки R=100 Ом,
- период импульсов Т=100 мкс.

Модель преобразователя в пакете Matlab (приложение Simulink) представлена на рис.2.

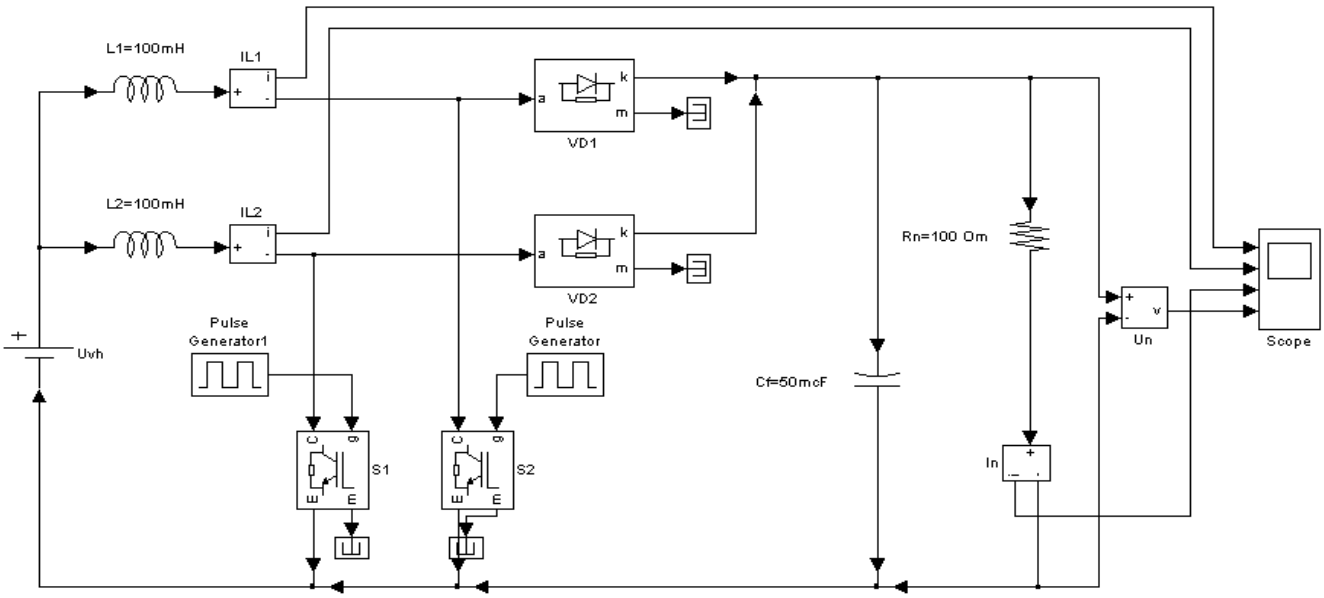


Рис.2. Модель импульсного преобразователя с двумя повышающими дросселями

Расчет основных параметров произведем по [2]:

- регулировочная характеристика аналогична характеристике обратноходового ШИП с одним накапливающим дросселем:

$$U_{вых} = \frac{U_{вх}}{(1-D)} = \frac{50}{1-0{,}75} = 200(B); \qquad (1)$$

- среднее значение тока нагрузки определим, исходя из закона Ома для участка цепи:

$$I_H = \frac{U_{вых}}{R_H} = \frac{200}{100} = 2(A); \qquad (2)$$

- определение токов дросселей $I_{L1}=I_{L2}=I_L$ проводиться исходя из баланса мощностей на входе и выходе схемы:

$$I_L = \frac{I_H}{2(1-D)} = \frac{2}{2(1-0{,}75)} = 4(A)\,; \qquad (3)$$

- определение средней мощности на выходе преобразователя, для средних значений выходного напряжения и тока нагрузки:

$$P = I_H \cdot U_{ВЫХ} = 2 \cdot 200 = 400(Вт)\,. \qquad (4)$$

Полученные диаграммы работы при Uвх=50 В и времени замкнутого состояния ключа τ =75 мкс (D=0,75) при принятых допущениях изображены на рис.3.

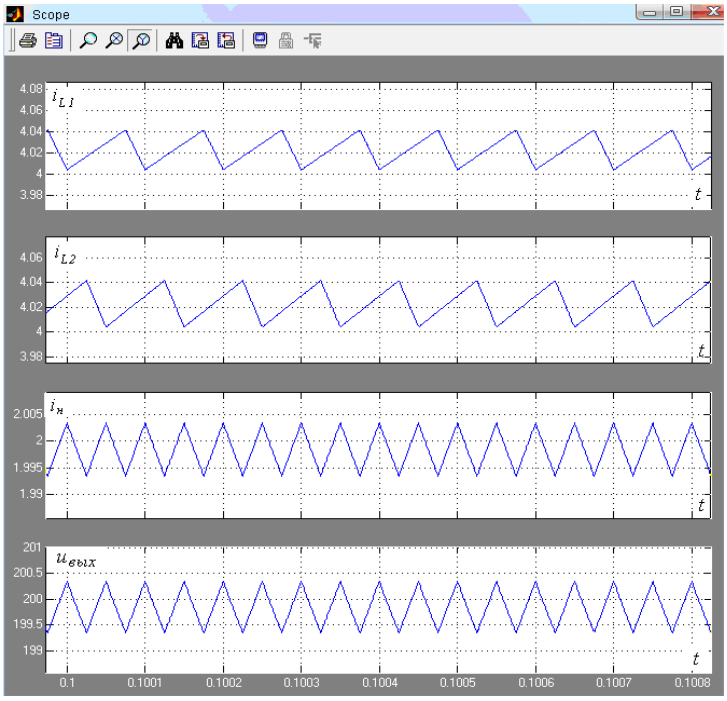


Рис. 3. Временные диаграммы импульсного преобразователя с двумя дросселями при $U_{вх}$=50 В и времени замкнутого состояния ключа τ =75 мкс

Временные диаграммы преобразователя при $U_{вх}$=150 В и времени замкнутого состояния ключа τ =25 мкс (D=0,25) приведены на рис. 4. По формулам (1)-(4) получим:

$$U_{вых} = \frac{U_{вх}}{(1-D)} = \frac{150}{1-0{,}25} = 200(B)\,;$$

$$I_H = \frac{U_{вых}}{R_H} = \frac{200}{100} = 2(A)\,;$$

$$I_L = \frac{I_H}{2(1-D)} = \frac{2}{2(1-0{,}25)} = 1{,}33(A);$$

$$P = I_H \cdot U_{ВЫХ} = 2 \cdot 200 = 400(Вт).$$

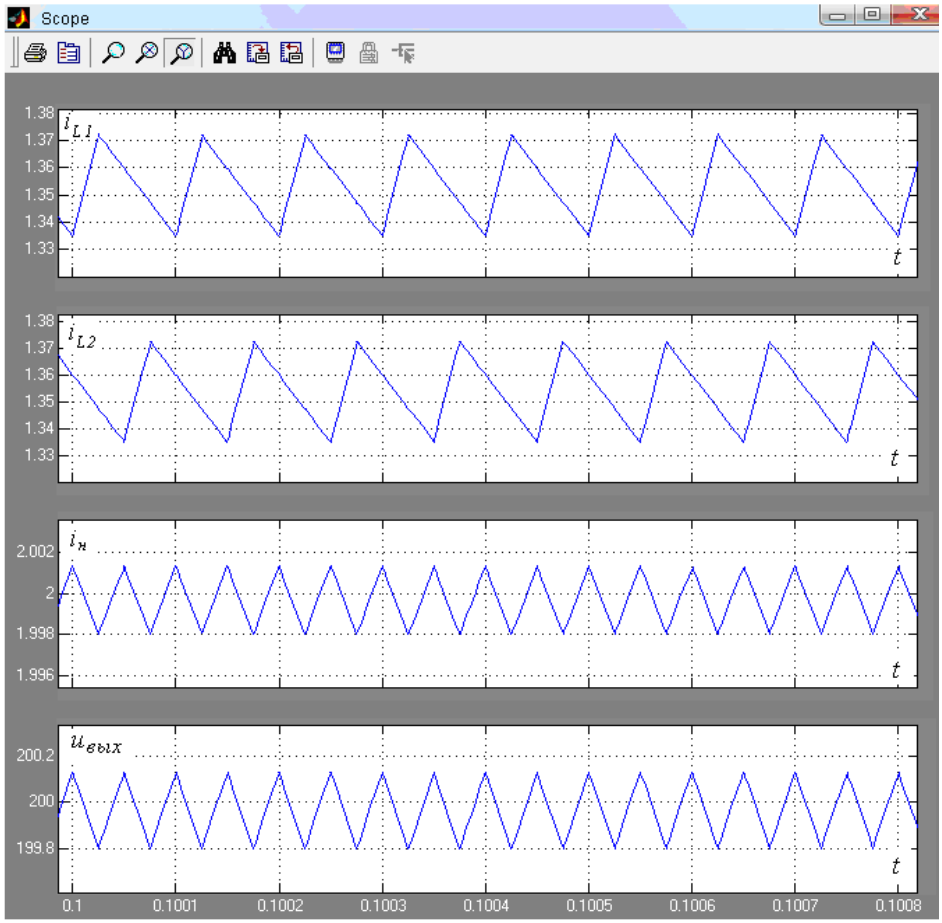


Рис. 4. Временные диаграммы импульсного преобразователя с двумя дросселями при $U_{вх}$=150 В и времени замкнутого состояния ключа τ =25 мкс

Выводы. Увеличение в 2 раза частоты пульсаций напряжения на выходе преобразователя при введении второй индуктивности позволяет получить на нагрузке более сглаженный сигнал. Таким образом, эффективность преобразователя с двумя повышающими дросселями при тех же параметрах схемы выше, чем у обратноходового ШИП с одним накапливающим дросселем. Полученные модели позволяют изучить аварийные и прочие режимы работы преобразователя.

Библиографический список

1. **Кастров М. Ю., Соловьев И. Н., Карзов Б. Н.** Преобразователь постоянного напряжения с двумя повышающими дросселями. Журнал Практическая силовая электроника №27, 2002.
2. **Мелешин В. И**. Транзисторная преобразовательная техника. Издательство Техносфера. Москва, 2005.

УДК 621.314

Л.С. ЛОМАКИНА, А.Н. МЕШКОВ, В.Г. ТИТОВ,
Г.М. МИРЯСОВ, А.Н. КУЗМЕНКОВ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ МОЩНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ АГРЕГАТОВ

Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексева

В работе рассматривается система управления электромагнитным подшипником компрессорного агрегата газоперекачивающей станции. Анализируется двухконтурная система управления.

Представлена импульсная система управления, в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части.

Проанализированы цифровые модели магнитного подвеса, что позволяет оптимизировать систему регулирования, обеспечивая требуемые показатели качества.

Ключевые слова: электропривод газокомпрессорных станций, электромагнитный подшипник, импульсная система управления.

Основными потребителями энергоресурсов в газовой промышленности являются газотранспортные предприятия (табл. 1.). Это связано с главной особенностью магистрального транспорта газа – при прохождении газа по трубопроводу возникает трение потока о стенку трубы, что вызывает потерю давления. Например, при расходе газа 90 млн.м^3/сут по трубе диаметром 1420 мм давление убывает с 7,6 до 5,3 МПа на участке L = 110 км. Поэтому транспортировать природный газ в достаточном количестве и на большие расстояния только за счет естественного пластового давления невозможно.

Таблица 1

Подотрасли	Потенциал энергозатрат
1. Транспорт газа	69,7 %
2. Распределение газа	7,5 %
3. Электротеплоснабжение	7,5 %
4. Добыча газа, конденсата, нефти	7,0 %
5. Переработка газа	4,6 %
6. Подземное хранение газа	3,5 %
7. Бурение и капремонт скважин	0,2 %

Повышение давления газа на компрессорных станциях (КС) осуществляется в одну, две и три ступени с помощью поршневых или центробежных нагнетателей, приводом которых могут служить электродвигатели, поршневые двигатели внутреннего сгорания и газотурбинные установки различных типов.

Оптимальный режим эксплуатации магистрального газопровода заключается в максимальном использовании его пропускной способности (газопода-

чи) при минимальных энергозатратах на компримирование, охлаждение и транспортировку. В значительной степени этот режим определяется работой компрессорных станций, устанавливаемых по трассе газопровода через каждые 100-150 км. Длина линейных участков между компрессорными станциями рассчитывается исходя из величины падения давления газа на одном участке, которое должно быть не более чем 1.6-2.5 Мпа. При выборе длины участков также учитывается требование привязки компрессорных станций к населенным пунктам и источникам электроэнергии.

Оптимальная работа компрессорных станций зависит от типа и числа газоперекачивающих агрегатов, установленных на станции, их энергетических показателей и технологических возможностей.

Режим работы современного газопровода, несмотря на наличие станций подземных хранилищ газа, характеризуется неравномерностью подачи и потребления газа в течение месяца, года. Оборудование и обвязка компрессорной станции приспособлены к переменному режиму работы магистрального газопровода, но это приводит к снижению загрузки газоперекачивающего агрегата и перерасходу энергопотребления из-за отклонения от оптимального КПД.

В настоящее время одним из направлений в совершенствовании, повышении надежности и экономической эффективности газоперекачивающих агрегатов является применение электромагнитных подшипников приводных двигателей и газовых нагнетателей.

В работе, на примере газового нагнетателя мощностью 16мВт перекачивающей станции «Помарская» газопровода «Уренгой – Помары – Ужгород», рассматриваются вопросы построения цифровой системы управления радиальным и осевым электромагнитными подшипниками (ЭМП). Рабочие зазоры между статором и ротором нагнетателя составляют 0.1 мм при весе ротора нагнетателя около одной тонны.

Система регулирования может быть двухконтурная или трехконтурная.

В разомкнутом состоянии система является неустойчивой. Постоянная времени внутреннего контура тока достаточно велика (~ 50 мс), что приводит к необходимости большой форсировки по источнику питания.

Двухконтурная система управления активным электромагнитным подшипником представлена на рис. 1 [1].

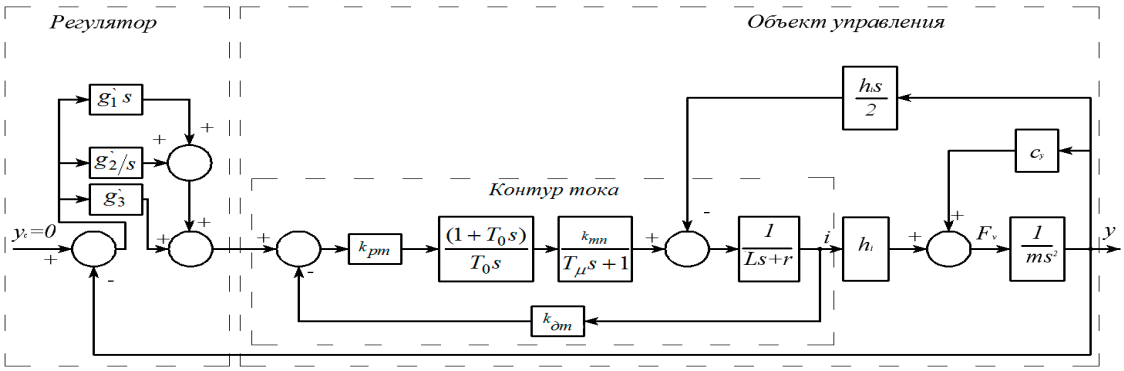


Рис.1. Структурная схема управления активным магнитным подшипником

Импульсная система управления (рис. 2) может быть представлена в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части. Импульсный элемент можно представить как последовательное соединение идеального элемента Т и формирующего элемента (фиксирующей цепи) с передаточной функцией H(s).

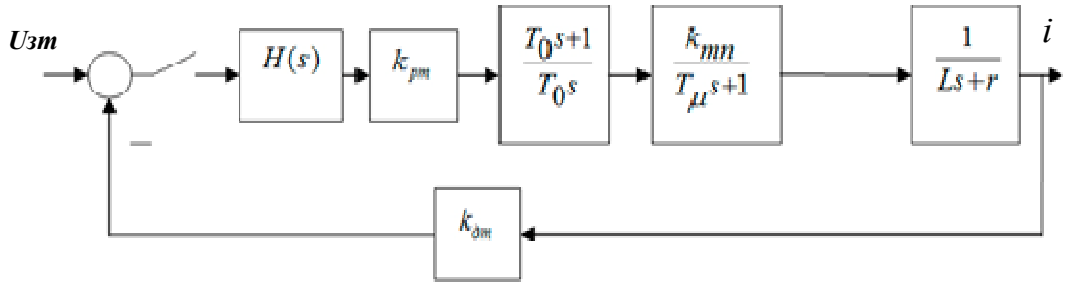


Рис. 2. Структурная схема замкнутой импульсной системы контура тока

Импульсная передаточная функция замкнутой системы контура тока

$$W(z)=\frac{Z\{H(s)W_1(s)\}}{1+Z\{H(s)W_1(s)W_2(s)\}}, \qquad (1)$$

где

$$W_1(s)=\frac{k_{\text{рт}}(1+T_0 s)k_{\text{тп}}}{T_0 s(1+T_\mu s)(Ls+r)}, \qquad (2)$$

$$W_2(s)=k_{\text{дт}}. \qquad (3)$$

Формирующий элемент создает прямоугольные импульсы относительной длительности γ с периодом повторения T. Передаточная функция формирующего элемента равна изображению прямоугольного импульса

$$H(s)=\frac{1-e^{-Ts}}{s}, \qquad (4)$$

где $T=2\cdot 10^{-5}$ с – период повторения импульсов.

Исходные данные для расчета импульсной передаточной функции:

$$g_1=8{,}003;\ g_2=1{,}2\times 10^6;\ g_3=3{,}526\times 10^4;\ k_{pm}=11{,}361;\ T_0=0{,}023\text{с};\ k_{mn}=22;$$

$$T_\mu=0{,}001\text{с};\ L=0{,}05\text{Гн};\ r=2{,}2\text{Ом};\ h_i=10^4\frac{\text{Гн}\cdot\text{А}}{\text{м}};\ m=1000\text{кг};\ c_y=10^9\frac{\text{Гн}\cdot\text{А}^2}{\text{м}^2}.$$

Передаточная функция замкнутого контура тока $W_{зкт}(s)$ определяется по формуле:

$$W_{зкт}(s) = \frac{\dfrac{k_{рт}k_{тп}(T_0 s+1)}{T_0 s(T_\mu s+1)(Ls+r)}}{1+\dfrac{k_{рт}k_{тп}k_{дт}(T_0 s+1)}{T_0 s(T_\mu s+1)(Ls+r)}}. \qquad (5)$$

Импульсная передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{ркт}(z) = \frac{z-1}{z} z\left\{\frac{W_{ркт}(s)}{s}\right\}. \qquad (6)$$

$$W_{ркт}(s) = \frac{k_{рт}k_{тп}(T_0 s+1)}{T_0 s(T_\mu s+1)(Ls+r)} \qquad (7)$$

Расчетные значения тока в замкнутом контуре представлены на рис.3.

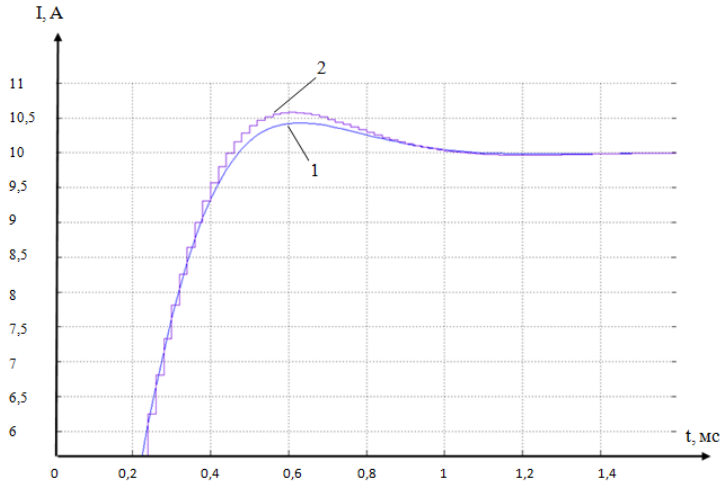


Рис.3. Сигналы на выходе контура тока при единичном входном воздействии для аналоговой (1) и цифровой (2) модели

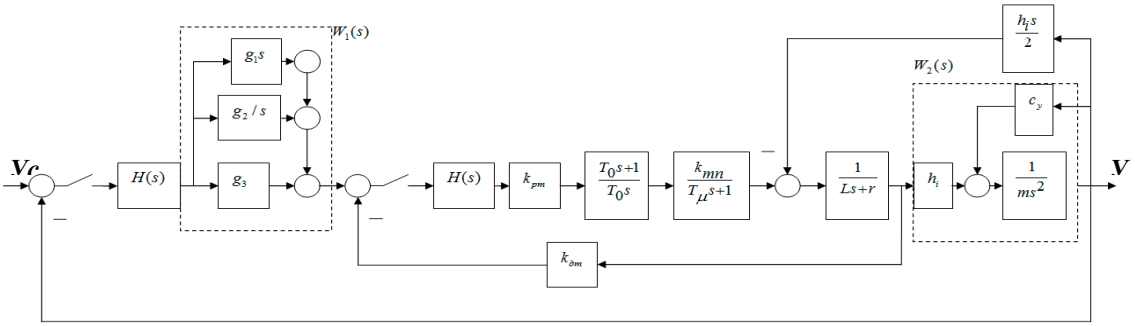


Рис.4. Структурная схема замкнутой импульсной системы контура положения

$$W_1(s) = g_1 s + \frac{g_2}{s} + g_3;\ W_2(s) = h_i \frac{1/ms^2}{1 - \frac{c_y}{ms^2}}. \tag{8}$$

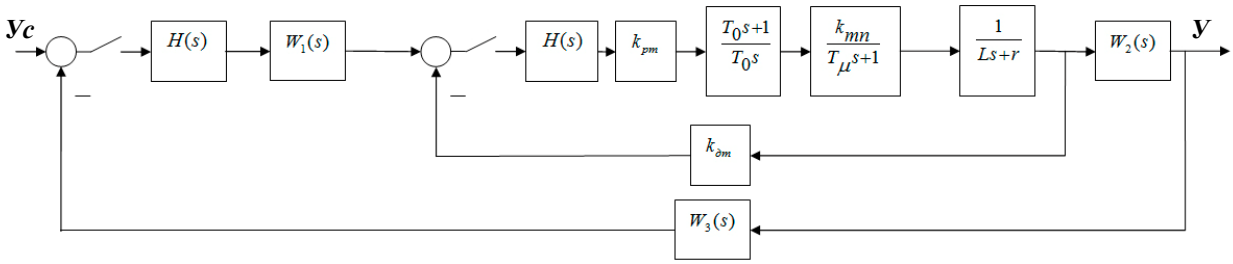


Рис.5. Преобразованная структурная схема контура положения с импульсным элементом

$$W_3(s) = \frac{hs/2}{\frac{W_1(s)k_{\text{тп}}k_{\text{рт}}(T_0 s+1)}{T_0 s(T_\mu s+1)}} + 1, . \tag{9}$$

Импульсная передаточная функция двухк онтурной системы управления:

$$W_{\text{зкп}}(z) = \frac{Z\{H(s)W_1(s)W_{\text{зкт}}(s)W_2(s)\}}{1 + Z\{W_4(s)\}}, \tag{10}$$

где

$$W_4(s) = W_1(s)W_{\text{зкт}}(s)W_2(s)W_3(s), \tag{11}$$

Импульсная передаточная функция разомкнутого контура положения

$$W_{\text{ркп}}(z) = \frac{z-1}{z} z\left\{\frac{W_{\text{ркп}}(s)}{s}\right\}, \tag{12}$$

где

$$W_{\text{ркп}}(s) = W_1(s)W_{\text{зкт}}(s)W_2(s). \tag{13}$$

Таким образом, разработанные цифровые модели магнитного подвеса позволяют оптимизировать систему регулирования. Также цифровая система (наряду с основным назначением — стабилизацией подвеса) может осуществлять

активный контроль за состоянием роторной системы: частотой вращения, вибрацией, нагрузкой на подшипники и другое.

Библиографический список

1. **Журавлев, Ю. Н.** Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.Н.Журавлев. - СПб.: Политехника, 2003. - 206 с.
2. **Абдурагимов, А. С.** Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА / А.С.Абдурагимов, А. В.Носков, А. П. Сарычев // Труды 15-ого Международного симпозиума «Потребители производители компрессоров и компрессорного оборудования». - СПб., 2010. – 128 с.

УДК 621.3.016.31

Л.С ЛОМАКИНА, Д.Г. САДИКОВ, В.Г. ТИТОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования частотно-регулируемого электропривода газоперекачивающего агрегата на базе многоуровневого инвертора напряжения. Рассмотрено влияния преобразователя частоты на питающую сеть и электродвигатель. Построена модель и произведены расчеты параметров высоковольтного частотно-регулируемого электропривода, системы управления. Результаты моделирования показали высокую эффективность применения многоуровневой топологии построения силовой части высоковольтного инвертора для электроприводного газоперекачивающего агрегата.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, частотно-регулируемый преобразователь, многоуровневый инвертор напряжения, питающая сеть, система управления.

В настоящее время и в обозримом будущем приоритетом мирового уровня в различных областях человеческой деятельности представляется экономия энергетических ресурсов. Потребление энергетических ресурсов является одной из основных статей затрат в производственной деятельности газотранспортного предприятия.

Реконструируемые в настоящее время электроприводные компрессорные станции были введены в эксплуатацию в основном в 80-х годах прошлого века. Электротехническое и технологическое оборудование, системы автоматизации технологических процессов морально и физически устарели. Старые газоперекачивающие агрегаты имеют ограниченные возможности по регулировке их производительности.

Эти обстоятельства не только приводят к более высоким затратам на транспортировку газа, но и снижают надежность и безопасность системы.

Основной задачей при создании проектов реконструкции электроприводных компрессорных станций является повышение надежности, экономичности транспорта газа, перевод производственных объектов газопровода на более высокий уровень автоматизации, внедрение малолюдных технологий, улучшение условий труда обслуживающего персонала и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Проектом в большинстве случаев предусматривается замена существующих электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) на современные комплектные ЭГПА. В состав такого агрегата входят система плавного пуска и регулирования частоты вращения ротора нагнетателя, магнитный подвес роторов электродвигателя и центробежного нагнетателя, агрегатная система управления. Активно применяются системы газодинамических уплотнений нагнетателя, что позволяет отказаться от маслохозяйства и уменьшить эксплуатационные расходы.

В результате проекта реконструкции КС одним из основных преимуществ в области энергосберегающих технологий является применение в составе ЭГПА частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты. Данная система позволяет значительно снизить потребление электрической энергии КС.

Выбор в пользу технологии применения частотно-регулируемых электроприводов делается ввиду того, что данная технология является наиболее экономически эффективной при эксплуатации магистральных газопроводов, работающих в переменных технологических режимах перекачки газа.

Кроме прямого эффекта от исключения непроизводительных затрат энергии при регулировании с использованием поворотно-направляющих аппаратов, дополнительный эффект при использовании частотно-регулируемого электропривода обеспечивается высоким значением КПД самого нагнетателя, оптимальным во всех режимах работы.

Применение частотно-регулируемого привода также позволяет уменьшить износ основного технологического оборудования КС.

ЭГПА является сложной и дорогой электромеханической системой. Технологически, транспорта газа – сложный и ответственный процесс, не допускающий остановов, простоев и аварийных ситуаций. Учитывая эти два фактора, поиск оптимальных режимов работы ЭГПА на объекте строительства или реконструкции является непростой и рискованной задачей, для решения которой не всегда есть соответствующие возможности. Учитывая эти факторы, можно сказать, что моделирование регулируемого ЭГПА на стадии проектирования является перспективным способом определения оптимальных режимов работы агрегата в заданных условиях газотранспортной системы. Это позволит во многом избежать трудностей при пусконаладке ЭГПА на объекте, уменьшить количество невынужденных остановов агрегата и нарушений работы газотранспортной системы. Моделирование также позволяет опробовать и отра-

ботать новые технические решения, без необходимости создания сложного и дорогого прототипа.

Как уже отмечалось в [1], наиболее перспективной топологией преобразователя частоты для ЭГПА на сегодняшний день является топология многоуровневого инвертора напряжения с каскадным соединением инверторных ячеек в каждой фазе.

Состав многоуровневого инвертора напряжения

Силовая схема каскадного многоуровневого инвертора может содержать от трех до десяти инверторных ячеек (рис. 1), включенных последовательно в каждую фазу.

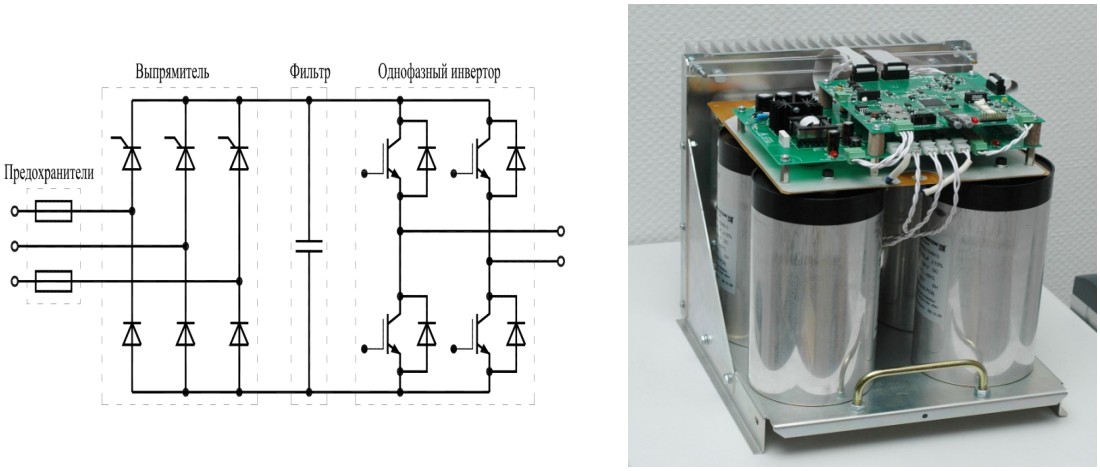


Рис. 1. Ячейка многоуровневого инвертора

Исследуемая схема для ЭГПА мощностью 9,1 МВт (см. рис. 2) содержит пятнадцать симметричных инверторных ячеек, по пять последовательно соединенных ячеек в каждой фазе. Такое подключение обеспечивает на зажимах электродвигателя линейное напряжение 5650 В. Инверторные ячейки запитываются каждая от отдельной вторичной обмотки входного многообмоточного трансформатора, соединенной в зигзаг для обеспечения необходимого фазового сдвига для формирования уровней выходного напряжения. Входной трансформатор многоуровневого инвертора напряжения первичной обмоткой подключается к трехфазной сети переменного напряжения 10 кВ промышленной частоты 50 Гц.

Действующее напряжение каждой инверторной ячейки определяется соотношением:

$$U_{2n} = \frac{U_л}{k * \sqrt{3}} \quad (1);$$

где k – количество ячеек в фазе.

Фазное напряжение на нагрузке формируется путем суммирования напряжений последовательно соединенных инверторных ячеек.

Угол сдвига вектора вторичного напряжения n-ной обмотки определяется по следующему выражению:

$$\varphi = \frac{60}{k} \cdot n_1 \qquad (2);$$

где $n1 = 1,2,3\ldots\frac{k-1}{2}$

Моделирование многоуровневого инвертора напряжения в системе MATLAB

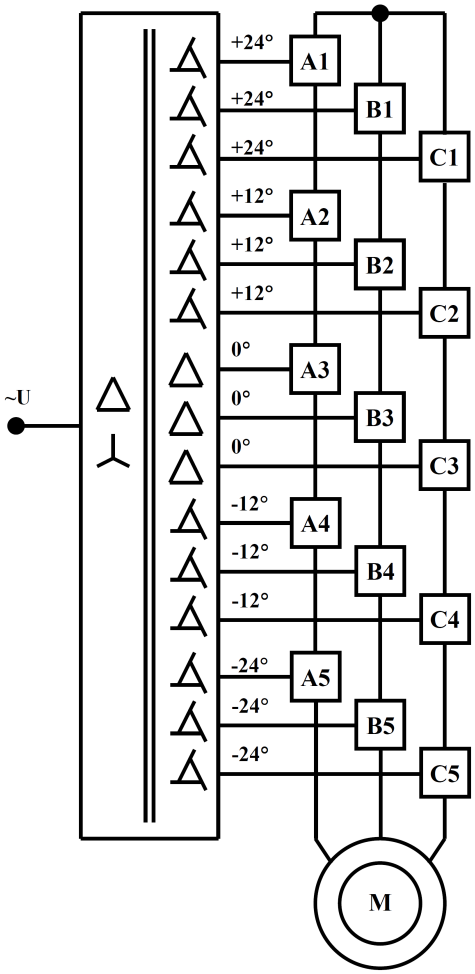


Рис. 2. Структурная схема силовой части многоуровневого инвертора напряжения

MatLab-модель ЭГПА (рис. 3) включает следующие элементы:

– трехфазный источник синусоидального напряжения, имитирующий трехфазную промышленную сеть на напряжение 10 кВ, частотой 50 Гц при полной мощности трехфазного короткого замыкания 300 МВА (Three-Phase Power Grid);
– многообмоточный трансформатор (Multi_Winding Transformer);
– инверторные ячейки H-bridge (A1-A5, B1-B5, C1-C5);
– блок, моделирующий резистивное сопротивление протяженной кабельной линии от преобразователя до зажимов электродвигателя (Three-Phase Cable Resistance);
– специализированный трехфазный асинхронный высокоскоростной электродвигатель мощностью 9,1 МВт на напряжение 5650 В (Asinchronous Machine);

три блока формирования ШИМ для инверторных ячеек соответствующих фаз (PWM_A, PWM_B, PWM_C). Многообмоточный трансформатор построен с помощью соединения стандартных блоков Zigzag Fase-Shifting Transformer с заданием необходимого фазового сдвига каждой вторичной обмотки.

MatLab-модель системы управления состоит из блока задания скорости и блока управления инвертором. Используется принцип векторного управления [2]. Система блока расчета сигналов управления инвертором состоит из регулятора скорости, регулятора потокосцепления ротора и блока вычисления задания фазных напряжений.

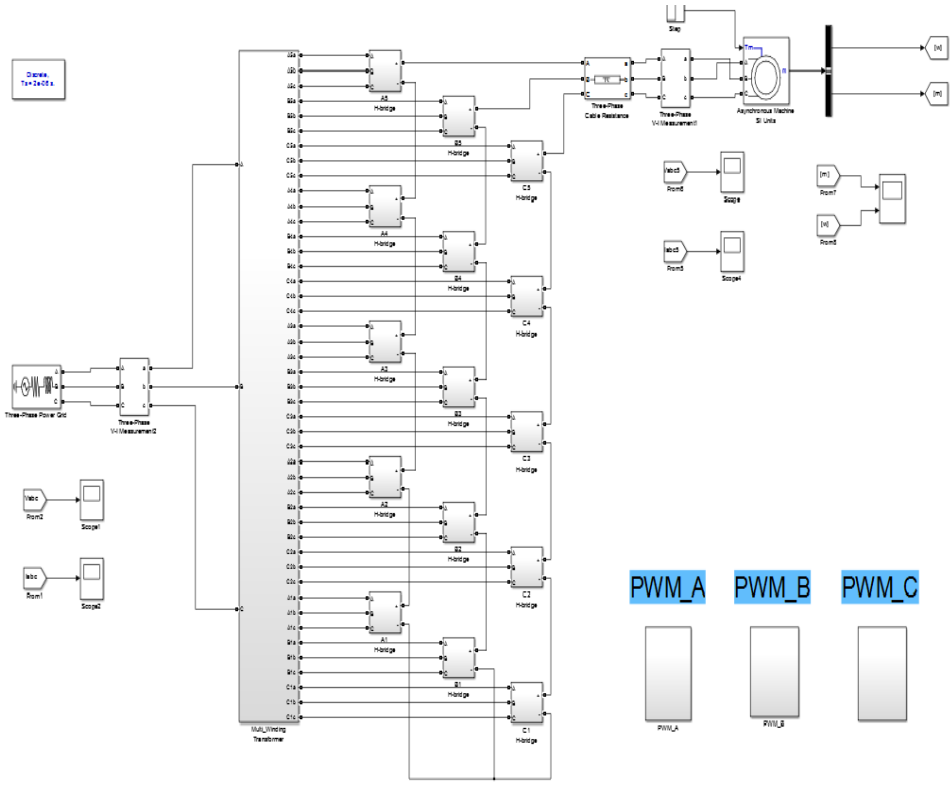


Рис. 3. MatLab-модель ЭГПА на базе многоуровневого инвертора напряжения

Регулятор скорости представляет собой ПИ-регулятор, на входы которого поступают сигналы задания скорости и сигнал обратной связи по скорости ротора электродвигателя ЭГПА.

Значения токов по продольной и поперечной осям *Id* и Iq получаем при помощи блока *abc_to_dq Transformation*, на вход которого подаются сигналы обратной связи по фазным токам статора и рассчитанные значения синуса и косинуса угла положения вектора потокосцепления ротора:

$$I_q = \frac{2}{3}\cdot\left[i_a\cdot\cos\theta + i_b\cdot\cos\left(\theta - \frac{2\cdot\pi}{3}\right) + i_c\cdot\cos\left(\theta + \frac{2\cdot\pi}{3}\right)\right]$$
$$I_d = \frac{2}{3}\cdot\left[i_a\cdot\sin\theta + i_b\cdot\sin\left(\theta - \frac{2\cdot\pi}{3}\right) + i_c\cdot\sin\left(\theta + \frac{2\cdot\pi}{3}\right)\right] \quad (3);$$

Угол положения вектора потокосцепления ротора находится по выражению:

$$\theta = \int(\omega_r + \omega_m)\,dt \quad (4);$$

где

$$\omega_r = \frac{L_{M*}\cdot I_q}{T\cdot\psi_r} \quad (5);$$

– скорость вращения ротора; ω_m – механическая скорость ротора.

Токи задания рассчитываются по выражениям:

$$I_{q*} = \frac{\psi_r}{L_{M*}}$$
$$I_{d*} = \frac{(L_{M*} + L'_{2*}) \cdot \psi_r}{L_{M*} \cdot T_{e*}} \quad (6);$$

Рассчитанные токи управления I_{d_reg}, I_{q_reg} получаются в соответствующих блоках, представляющих собой дискретные ПИ регуляторы.

Сигналы управления инвертором рассчитываются выполнением обратного перехода от системы координат *dq* в *abc*

$$u_{a_reg} = I_{d_reg} \cdot \sin\theta + I_{q_reg} \cdot \cos\theta$$
$$u_{b_reg} = 0.5 \cdot \left[\left(\sqrt{3} \cdot \sin\theta - \cos\theta\right) \cdot I_{q_reg} - \left(\sin\theta + \sqrt{3} \cdot \cos\theta\right) \cdot I_{d_reg}\right] \quad (7);$$
$$u_{c_reg} = -u_{a_reg} - u_{b_reg}$$

Блоки формирования и распределения импульсов управления (PWM_A, PWM_B, PWM_C) представляют собой ШИМ генераторы, передающие импульсы управления транзисторами Н-мостовых ячеек соответствующего уровня. Формирование импульсов управления транзисторами каждой фазы происходит сравнением пяти уровней пилообразного опорного напряжения и одной синусоидальной огибающей, заданной частоты, как показано на рис. 4.

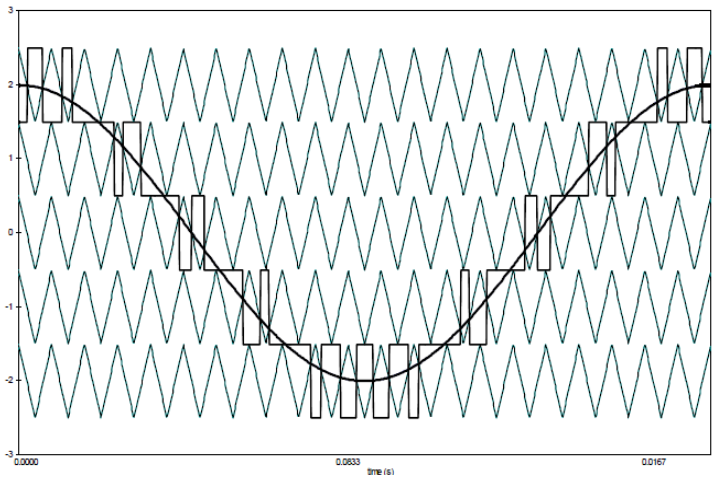


Рис. 4. Принцип формирования импульсов управления транзисторами мостовых ячеек одной фазы

Результат работы MatLab-модели ЭГПА

Синтезированная MatLab-модель ЭГПА позволяет в реальном времени проводить исследования статических и динамических режимов работы ЭГПА, переходных процессов, происходящих в системе. На рис. 5 представлены осциллограммы электромагнитного момента на валу ЭГПА и скорости вращения ротора при разгоне электродвигателя до номинальной скорости и набросе статической нагрузки.

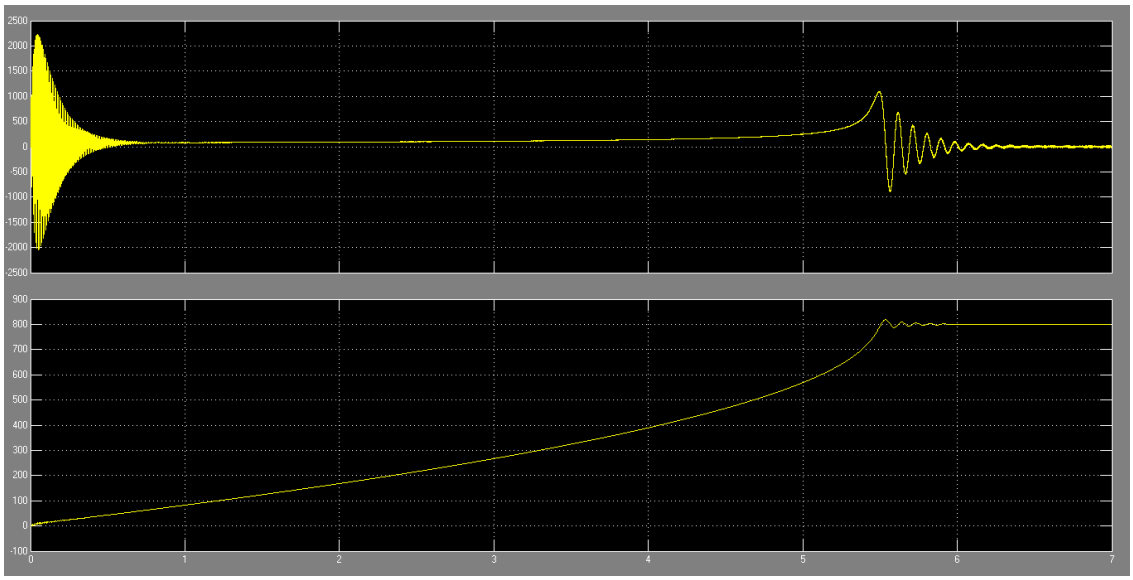


Рис. 5. Осциллограммы электромагнитного момента (вверху) и скорости вращения вала (внизу) электродвигателя ЭГПА при пуске, разгоне до номинальной скорости и набросе статической нагрузки

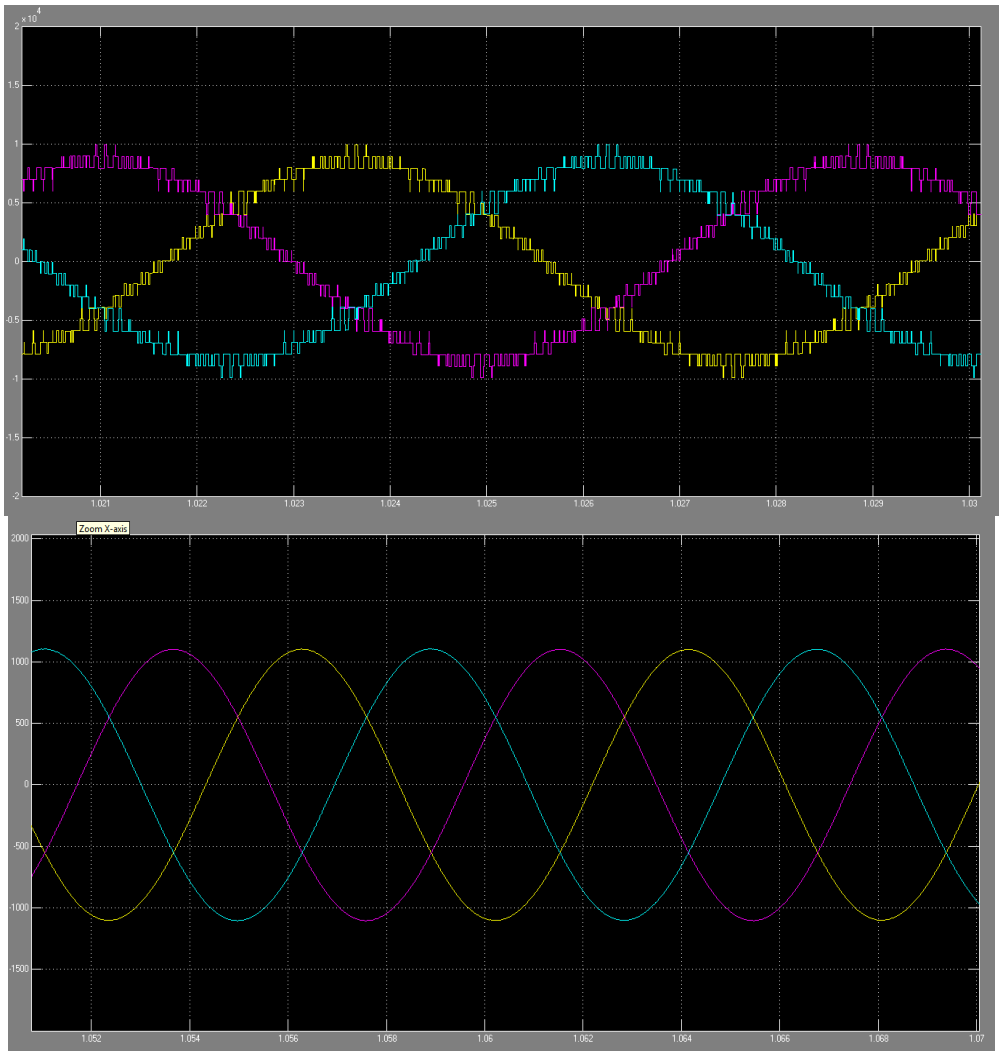


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (вверху) и тока (внизу) на выходе многоуровневого инвертора напряжения

Выводы

Многоуровневый инвертор напряжения на сегодняшний день является наиболее перспективной топологией построения силовой части высоковольтных преобразователей частоты для регулируемого электропривода.

На стадии рабочего проектирования электроприводных компрессорных станций необходимо уделять внимание построению компьютерной модели разрабатываемой системы и анализа возможных установившихся и переходных режимов работы агрегатов.

В среде MatLAB/Simulink разработана компьютерная модель регулируемого ЭГПА мощностью 9,1 МВт на базе многоуровневого инвертора напряжения. Данная модель может быть использована для анализа режимов работы станции на стадии разработки проектной документации.

Разработана система векторного управления ЭГПА, обеспечивающая высокие энергетические характеристики системы, построение интеллектуальной системы электроснабжения, а также позволяющая реализовывать концепцию малолюдных технологий на компрессорной станции.

Библиографический список

1. **Д.Г. Садиков** Выбор перспективной топологии построения преобразователя частоты для высоковольтного электродвигателя электроприводного газоперекачивающего агрегата / Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона» №1, 2014 г.
2. **Колпаков А., Карташев Е.** Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями [Текст] // «Силовая электроника», 2009, №2. – с. 57-65.
3. **Пужайло А.Ф., Спиридович Е.А., Воронков В.И. и др**. Энергоснабжение и автоматизация энергооборудования компрессорных станций [Текст]: Монография / Под ред. О.В. Крюкова. – Н.Новгород: Вектор ТиС, 2011. – 664 с.

УДК 621

А.Н. МАЛЬЦЕВ, О.С. ХВАТОВ

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ

Волжская государственная академия водного транспорта

В статье рассматривается канализационная насосная станция г. Бор. Для данной станции приведен детальный экономический расчет экономии электроэнергии после внедрения частотного регулирования электроприводом насосного агрегата. Также учтен фактор изменения КПД насоса при выводе его в рабочий диапазон в зависимости от частоты вращения.

Ключевые слова: частотное регулирование, экономическая эффективность, канализационные насосные станции.

Вопросом энергоэффективного применения частотного регулирования на канализационных насосных станциях (КНС) уделяется, на наш взгляд, недостаточно внимания. Это происходит при существующем в определенных кругах специалистов мнении о неэффективном применении преобразователя частоты (ПЧ) на КНС [1,2,3], с чем авторы не могут согласиться.

Настоящая статья не предполагает освещения технической актуальности применения частотного регулирования на канализационных насосных станциях. В данном случае будет рассчитана экономическая эффективность внедрения данного вида автоматизации средствами частотного регулирования применительно к существующей станции г.Бор и исходными данными является КНС, на которой установлено два перекачивающих насоса марки СД 250/22,5а с двигателями мощностью 30 кВт и номинальной частотой вращения 1500 об/мин., сдвоенная труба напорного коллектора диаметром 2х325 мм. Насосы работают попеременно, чтобы исключить их заиливание. Общее время работы составляет 12 часов в сутки. Коэффициент полезного действия насосного агрегата составляет 58%.

Пользуясь исходными данными и методикой, описанной в [4], для начала построим гидравлическую характеристику системы и напорную характеристику для одного работающего насосного агрегата (рисунок 1).

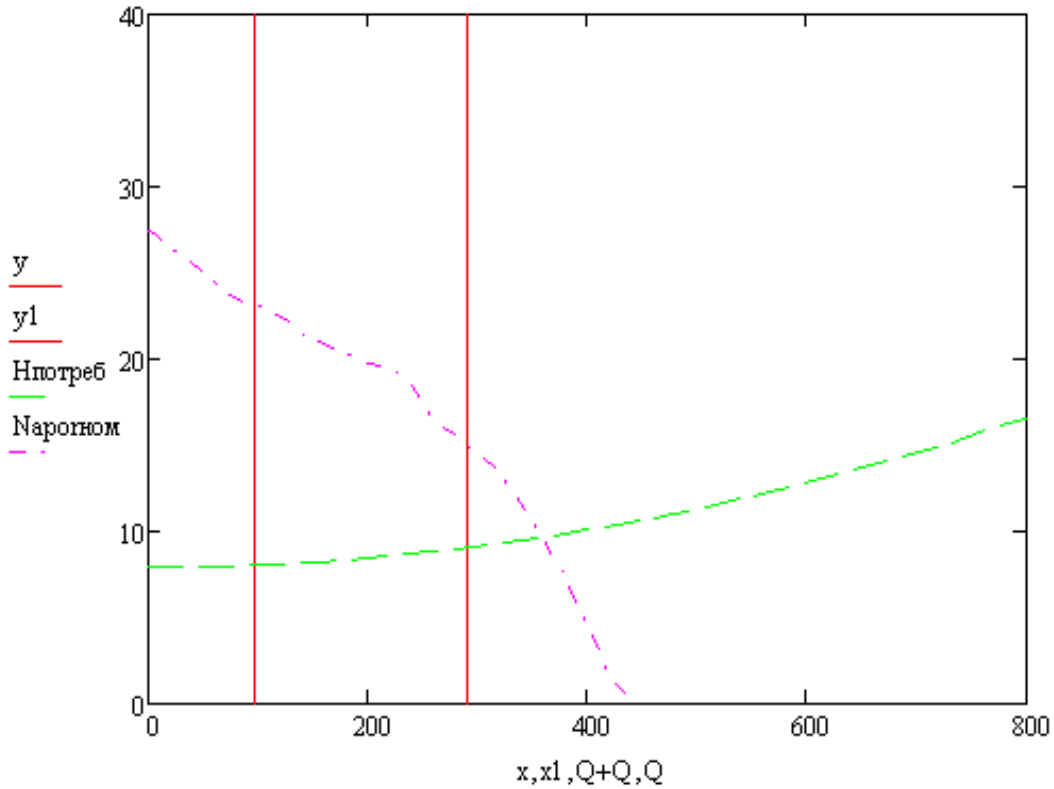


Рис. 1. Напорная характеристика и гидравлическая характеристика системы

Из рисунка видно, что рабочая точка данной системы лежит за пределами номинальной рабочей области (вертикальные линии на рисунке 1), что приводит к снижению КПД насосного агрегата. Рассчитаем КПД насоса, $\eta_{\text{насоса}}$, воспользовавшись формулой [5]:

$$\eta_{\text{насоса}} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{367 \cdot P_{\text{ном}}} = \frac{1100 \cdot 370 \cdot 9}{367 \cdot 30 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 33{,}2\%, \quad (1)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м^3;

Q – подача, развиваемая насосом, м^3/ч;

H – напор, создаваемый насосом, м;

367 – переводной множитель (константа);

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность на валу двигателя, Вт.

Из формулы видно, насколько занижен КПД насосного агрегата в результате вывода его из номинальной рабочей зоны.

Применение частотного преобразователя позволит ввести насосный агрегат в номинальную рабочую зону, тем самым повысив его КПД. Ранее авторами была получена зависимость изменения КПД от величины статической составляющей напора (рисунок 2).

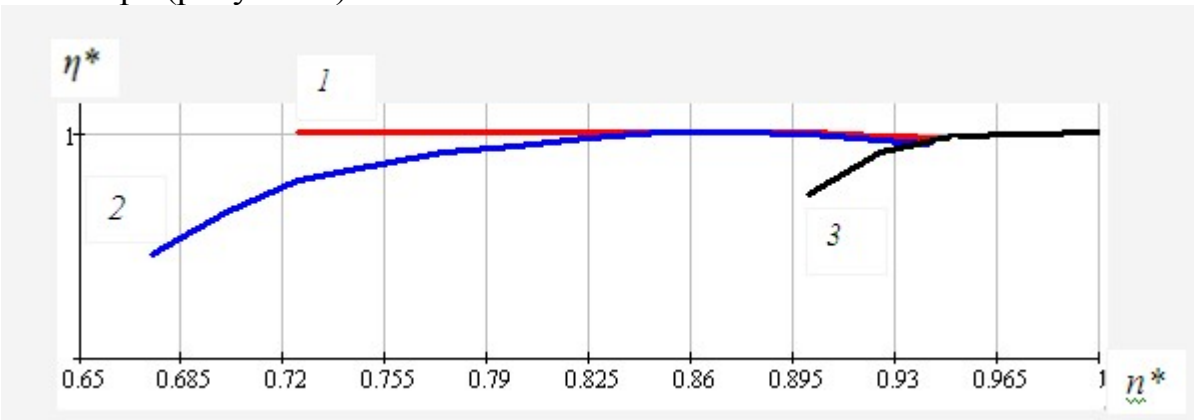


Рис. 2. Изменение КПД насоса в зависимости от изменения скорости вращения при различных значениях $H_п/H_ф$: 1 – 0; 2 – 0,48; 3 – 0,8.

Из рисунка 2, с учетом соотношения $H_п/H_ф$ = 0,32, следует, что существенного снижения КПД насосного агрегата при снижении скорости вращения в пределах $0{,}7n_{\text{ном}} < n < n_{\text{ном}}$ наблюдаться не будет. Ранее авторами получена система ограничений скорости насосного агрегата.

$$\begin{cases} n_{min} \geq 0.1 - 0.15 \cdot n_{\text{ном}}, \\ n_{min} > n_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_п}{H_ф}}, \\ n_{min} \geq n_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{A \cdot v}{Q_б}\right) \cdot \left(1 - \frac{H_п}{H_ф}\right) + \frac{H_п}{H_ф}}. \end{cases} \quad (2)$$

В данном случае лимитирующим фактором будет выступать ограничение по скорости потока перекачиваемой жидкости – неравенство 3. Учитывая, что скорость сточных вод в гидросистеме не должна опускаться ниже 0,7 м/с [6], минимальная скорость вращения для рассматриваемой КНС составит 1234 об/мин. Таким образом, диапазон регулирования скорости вращения составит (1234 ÷ 1500) об/мин.

Общее время работы насосов составляет 12 часов в день при следующих расчетных данных:

$$Q_{расч} = \frac{370}{3600} = 0{,}103\frac{м^3}{с}, \quad (3)$$

$H_{расч} = 9$ м.

Потребляемая частотным электроприводом насоса мощность $P_{расч}$, кВт равна:

$$P_{расч} = \frac{1100 \cdot 9{,}81 \cdot Q_{расч} \cdot H_{расч}}{1000 \cdot \eta_{насоса} \cdot \eta_{пч} \cdot \eta_{дв}} = 33{,}95 \text{ кВт}. \quad (4)$$

Тогда потребляемая энергия , $W_{расч}$, кВт* ч за один год:

$t_{раб} = 12$ ч,

$t_{день} = 24$ ч,

$$W_{расч} = P_{расч} \cdot \frac{t_{раб}}{t_{день}} \cdot 8760 = 148\,701 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}. \quad (5)$$

Изменяя частоту вращения насосного агрегата, мы снизим его производительность. Для того, чтобы перекачивать тот же объем стоков, необходимо увеличить время работы насосного агрегата во столько же раз, во сколько изменится частота его вращения. Увеличим время работы, исходя из соотношения:

$$\frac{n_{ном}}{n_{min}} = \frac{1500}{1234} = 1{,}22, \quad (6)$$

$$t_{увелич} = t_{раб} \cdot 1{,}22 = 14{,}59 \text{ ч}.$$

Значения подач насоса при разных скоростях вращения, а соответственно, и времени работы можно связать соотношением (7).

$$\frac{Q_{расч}}{Q} = \frac{t_{увелич}}{t_{раб}}. \quad (7)$$

Значение подачи при переходе на новую частоту вращения *n* =1234 об/мин будут связаны с расчетной подачей соотношением:

$$Q = Q_{расч} \cdot \frac{t_{раб}}{t_{увелич}} = 82{,}3\%.$$

Потребляемая частотным электроприводом насоса мощность при новой подаче, с учетом вывода насоса в зону номинального КПД составит:

$$P_{82,3\%} = \frac{1100 \cdot 9,81 \cdot Q_{расч} \cdot H_{расч}}{1000 \cdot \eta_{насосаном} \cdot \eta_{ПЧ} \cdot \eta_{дв}} \cdot (0,82)^3 = 10,65 \text{ кВт}. \quad (8)$$

Отметим, что зависимость потребляемой насосным агрегатом мощности от частоты вращения при наличии статической составляющей напора не будет кубической. Реальный показатель степени, опираясь на выводы в [4], для рассматриваемой КНС составляет 4,2, а значит и экономический эффект от применения должен быть выше.

Потребляемая частотным электроприводом насоса энергия в новом рабочем режиме составит:

$$W_{82,3\%} = P_{82,3\%} \cdot \frac{t_{82,3\%}}{t_{день}} \cdot 8760 = 56721,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}. \quad (9)$$

Экономия потребляемой энергии $W_{эк}$ при снижении производительности Q равна:

$$W_{эк} = W_{расч} - W_{82,3\%} = 91979,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Средняя стоимость 1 кВт/ч в г.Бор составляет 4,5 рубля. Посчитаем экономический эффект от применения частотного регулирования на КНС:

$$C_э = 4,5 \cdot W_{эк} = 413\,907 \text{ рублей}. \quad (10)$$

Таким образом, доказана экономическая целесообразность применения частотного регулирования на КНС. Одновременно с экономией электроэнергии, выполняя условия системы ограничений по частоте вращения насосного агрегата, появляется возможность не допускать заиливание гидросооружений, исключить гидроудары в системе.

Библиографический список

1. **Матисон В.А., Степанов В.Б**. Современные системы управления канализационными насосными станциями. Электронный каталог. http://www.elpri.ru/pdf/su_kns.pdf.
2. **Брошюра** Energy Comparison VFD vs. ON-OFF Scientific Impeller 1998.
3. **Брошюра** Economical Aspects of Variable Frequency Drives in Pumping Stations. 1994, ITT Flygt System Engineering.
4. **Лезнов Б.С**. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006
5. **Брошюра KSB**. Расчет параметров центробежных насосов. Перевод с англ. Электронный каталог.
6. **СНиП 2.04.03-85** «Канализация. Наружные сети и сооружения», 2012.

УДК 621.31

А.Б. ДАРЬЕНКОВ, И.С. ПОЛЯКОВ, С.А. ГУЗЕВ

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОЭКОНОМИЧНОЙ АВТОНОМНОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена имитационная модель автономной электростанции на основе дизель-генератора переменной частоты вращения. Система управления электростанцией включает в свой состав нейросетевой задатчик экономичного режима, обеспечивающий минимальный расход топлива дизеля.

Ключевые слова: электростанция, дизель, задатчик экономичного режима, нейронная сеть.

Подавляющее большинство дизель-генераторных установок работает с постоянной (номинальной) частотой вращения вала во всем диапазоне изменения нагрузки. Однако, работа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при постоянной частоте вращения и переменной нагрузке характеризуется неоптимальным расходом топлива. Разработка и создание дизель-генераторной установки, работающей при переменной и зависящей от нагрузки генератора частоте вращения приводного ДВС, обеспечит существенную экономию топлива (до 20%) и является актуальной народно-хозяйственной задачей [1,2].

При построении дизель-генераторных установок переменной частоты вращения (ДГПЧВ) сложной задачей является определение зависимости оптимальной частоты вращения ДВС от величины нагрузки $\omega_{опт} = f(P)$. Конечно, эту зависимость можно определить по многопараметровой характеристике ДВС, но эта зависимость индивидуальна для каждого двигателя и меняется в зависимости от условий внешней среды, степени износа и марки топлива.

Обеспечить оптимальный режим потребления топлива ДВС возможно посредством специального устройства - задатчика экономичного режима (ЗЭР). Имитационная модель ДГПЧВ, оснащенной ЗЭР, разработана в пакете Matlab Simulink (рис. 1) и подробно описана в [1].

При построении имитационной модели ЗЭР использована математическая модель радиально-базисной нейронной сети с тремя слоями, которая описывается следующей системой уравнений [3]:

$$\left.\begin{aligned} X_{11} = X_{12} = P_{нагр} \cdot K_{норм} \\ X_{21} = th(W_{11} \cdot X_{11} + B_1) \\ X_{22} = th(W_{12} \cdot X_{12} + B_2) \\ \omega_{опт} = th(W_{21} \cdot X_{21} + W_{22} \cdot X_{22} + B_3) \end{aligned}\right\}$$

Разработанная в пакете Matlab Simulink имитационная модель ЗЭР представлена на рис. 2.

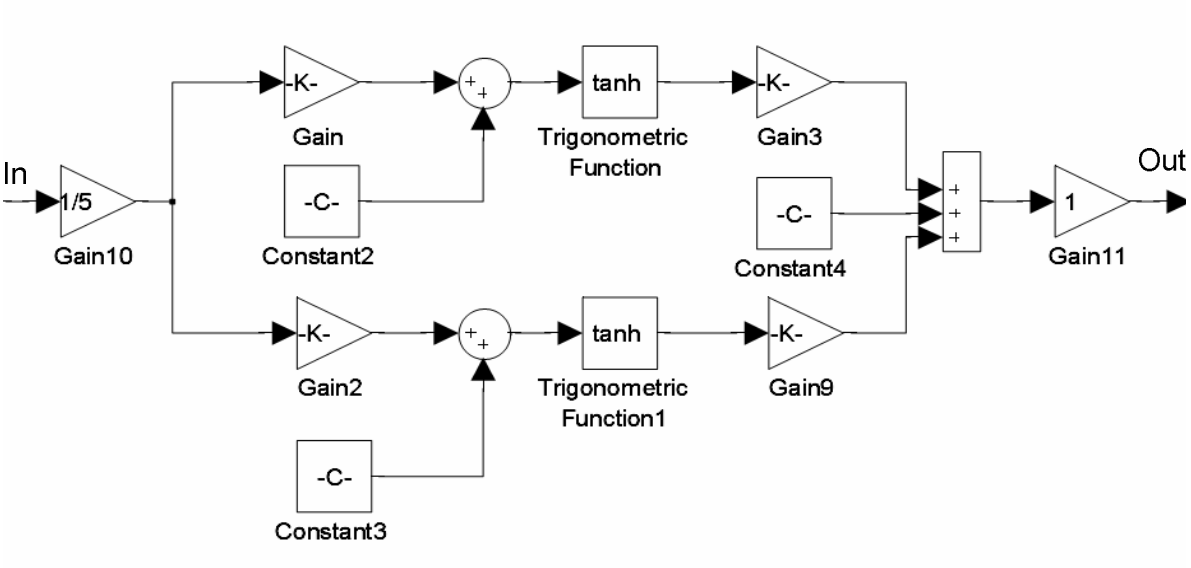
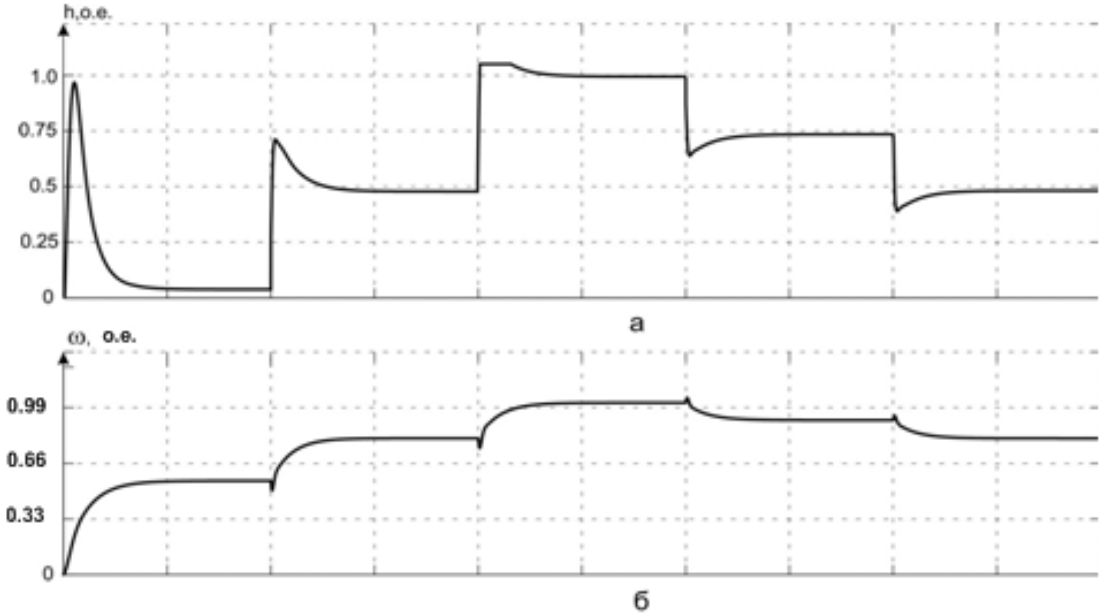


Рис. 2. Имитационная модель ЗЭР

На рис. 3 приведены временные диаграммы работы ДГПЧВ с ЗЭР. На них изображены траектории перемещения рейки топливного насоса h ДВС (рис. 3,а), частоты вращения ω вала ДВС (рис. 3,б), выходного напряжения $U_{СГ}$ синхронного генератора (рис. 3,в), а также управляющего воздействия H ЗЭР (рис. 3,г) и тока нагрузки $I_{нагр}$ (рис. 3,д).



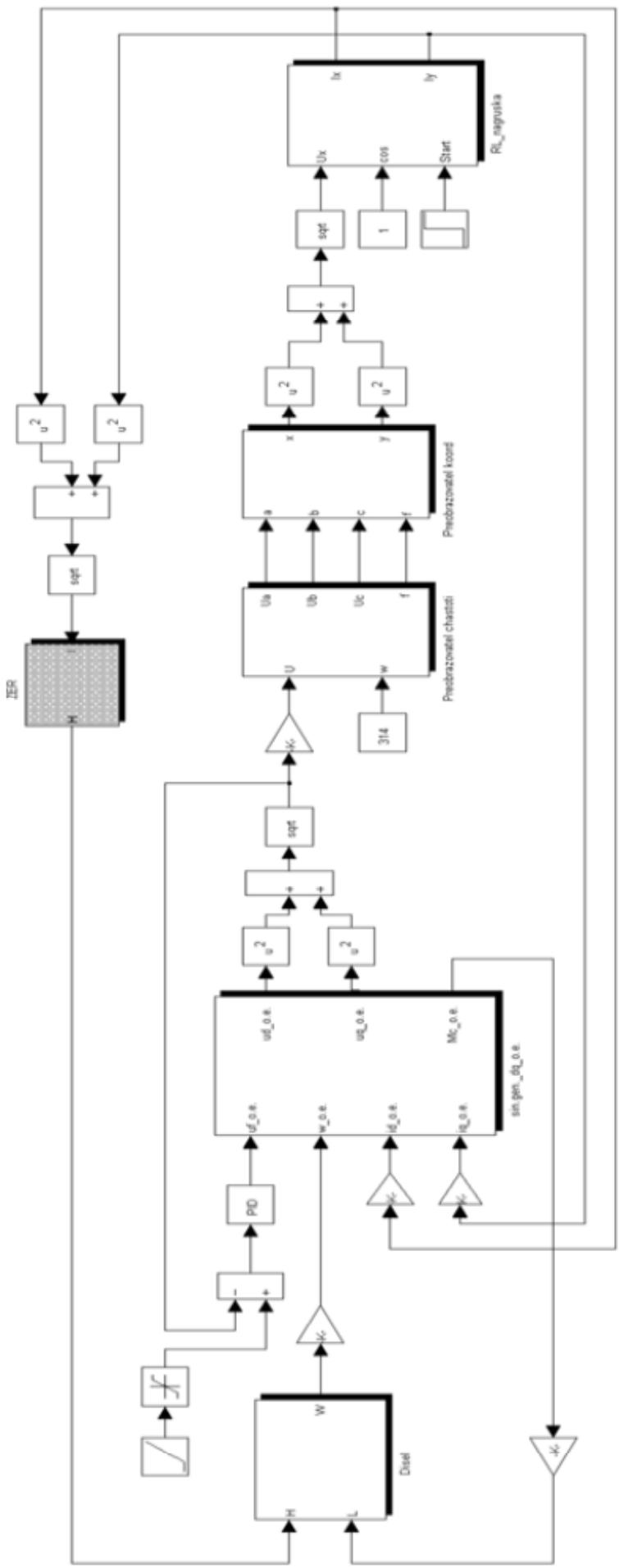


Рис. 1. Имитационная модель ДГПЧВ с ЗЭР

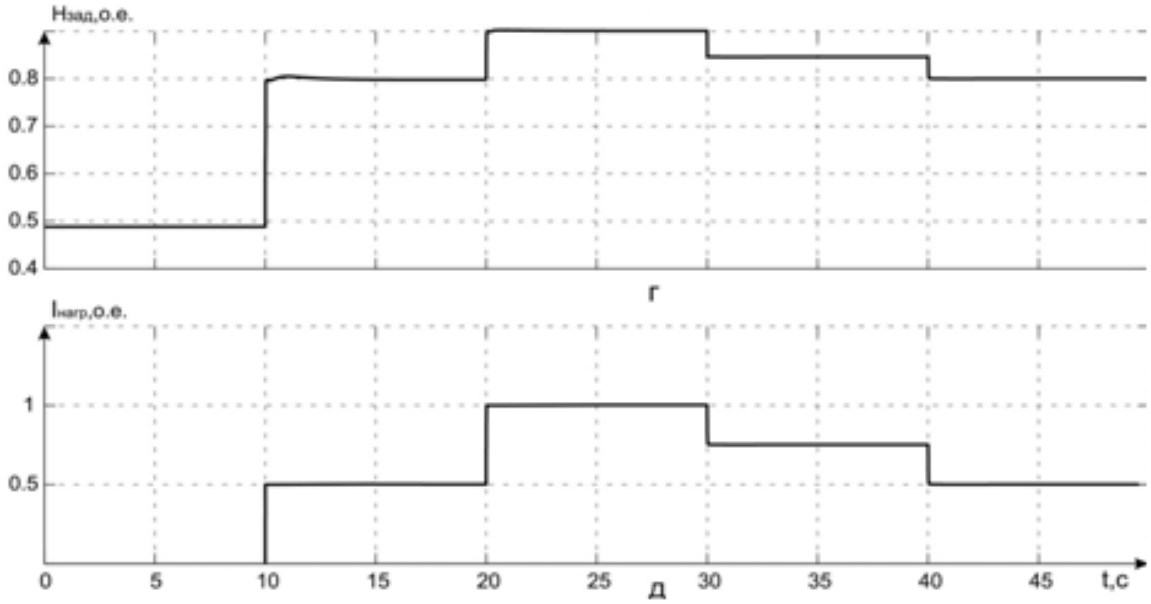


Рис. 3. Результаты моделирования системы ДГПЧВ

а – траектория перемещения рейки топливного насоса h, о.е.; б – изменение частоты вращения вала ДВС ω, рад/с; в – изменение амплитуды выходного напряжения $U_{СГ}$, В; г – управляющее воздействие H ЗЭР, о.е.; д – циклограмма изменения тока нагрузки $I_{нагр}$, о.е.

Из результатов моделирования видно, что при изменении тока нагрузки $I_{нагр}$ (рис. 3,д) происходит изменение управляющего воздействия $H_{зад}$, (рис. 3,г) на систему управления рейкой топливного насоса. Взменение положения рейки топливного насоса (рис. 3,а) влечет изменение частоты вращения вала ω ДВС (рис. 3,б). При этом происходит стабилизация напряжения синхронного генератора $U_{СГ}$ (рис. 3, в).

Разработанные при моделировании в Matlab Simulink алгоритмы ЗЭР были реализованы на базе современной микропроцессорной техники при создании лабораторного образца автономной электростанции на основе ДВС переменной частоты вращения мощностью 3 кВт [1].

Библиографический список

1. Поляков, И.С. Дизель-генераторная установка переменной частоты вращения: дисс. … канд. техн. наук: 05.09.03 / И.С. Поляков; ВГАВТ. – Н.Новгород, 2013. – 155 с.

2. Алешков, О.А. Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: автореферат дисс. … канд. техн. наук 05.04.02. АлтГТУ / О.А. Алешков. – Барнаул, 2009. – 16с.

3. Барский, А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. - М.: Финансы и статистика, 2004. - 176 с.: ил.

УДК 621.3

А.Б. ДАРЬЕНКОВ, Д.Б. КУРИЦЫН, В.В. СОКОЛОВ

МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ НИЖНЕГО И ВЕРХНЕГО УРОВНЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

В статье рассмотрены варианты построения систем удаленного управления с использованием современных стандартов связи в мобильных устройствах. Указаны основные характеристики GSM, Wi-Fi, Bluetooth технологий. Приведены примеры функциональных схем различных систем удаленного управления.

Ключевые слова: SCADA система, технологический процесс, программируемый логический контроллер, удаленное управление, GSM, Wi-Fi, Bluetooth, человеко-машинный интерфейс.

В настоящее время инженерами решаются различные задачи по автоматизации автономных объектов, отдельных технологических процессов, а также крупных производств. В настоящее время в автоматизированные системы управления технологическим процессом активно внедряются SCADA системы. SCADA (аббревиатура от английского supervisory control and data acquisition, диспетчерское управление и сбор данных) - это программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. Результатом применения подобных программ является появления удалённых диспетчерских пультов, которые строятся на базе персональных компьютеров, подключенных к серверу, в котором хранится информация обо всех параметрах объекта мониторинга. В тех случаях когда, глубокая автоматизация технологического процесса является слишком сложной или требующей больших финансовых вложений, то в качестве альтернативного варианта проводится частичная автоматизация производства.

Одним из решений в этом направлении является применение PLC модемов. Power Line Communications (PLC) — телекоммуникационная технология, базирующаяся на использовании электросетей для высокоскоростного информационного обмена. Для приёма передачи используется частотный диапазон 4-21 МГц. Информационный поток разделяется на несколько низкоскоростных соединений, каждое из которых передается на отдельной частоте с последующим их объединением в один сигнал. Для работы с технологией PLC пользователю необходимо использовать PLC-адаптер — клиентское устройство небольшого размера, вставляющегося прямо в розетку, которое имеет сетевой порт RJ-45 Fast Ethernet. При помощи сетевого кабеля PLC-адаптер соединяется с компьютерным или телекоммуникационным оборудованием (хабом, свитчем и Wi-Fi роутером).

В этой нише нашли свое применение и планшетные компьютеры. Они представляют собой мобильные устройства, оснащенные модулями связи стандартов GSM/GPRS, Wi-Fi, Bluetooth. Эти компьютеры имеют сенсорный экран, позволяющий осуществлять управление прикосновением руки к окнам человеко-машинного интерфейса. Основные преимущества и недостатки удаленного управления через эти устройства, связаны с используемыми в них стандартами связи.

В GSM-сети для передачи данных используются различные сервисы. Рассмотрим основные из них. Первым является SMS (аббревиатура от английского Short Message Service, сервис коротких сообщений). Этот сервис имеет ограничение на объем передаваемых данных (160 символов), относительно высокую стоимость и не гарантируемую надежность передачи данных. Применяется в основном в охранно-пожарных системах. Второй тип CSDN (аббревиатура от английского Circuit Switched Data Network, сеть передачи данных с коммутацией каналов). Данные передаются в выделенном канале при установлении соединения со скоростью не превышающий 9,6 кбит/с.

К преимуществам сервиса относится то, что если соединение установлено, то данные дойдут за фиксированное время. К его недостаткам, можно отнести: повременную оплату и сложность использования в системах, требующих быстрой реакции на событие (необходимо время, чтобы дозвониться). Третий тип GPRS (аббревиатура от английского General packet radio Service, пакетная радиосвязь общего пользования). Это сервис с пакетной передачей данных, скорость до 171/473 кбит/с, постоянное соединение с сетью (не надо дозваниваться до абонента). Передача пакетов идет по неиспользуемым в данный момент голосовым каналам, которые всегда есть в промежутках между разговорами абонентов[1].

К достоинствам технологии GSM можно отнести постоянную готовность к передаче данных и тарификацию объема передаваемых данных, а не времени соединения. К недостаткам - выделение слотов для соединения по остаточному принципу. Пример построения системы с использованием GSM показан на рисунке 1а.

На сегодняшний день Bluetooth это самая популярная радиотехнология ближнего радиуса действия. Его протокол поддерживает как соединения типа точка-точка (см. Рисунок 1г), так и точка-многоточка. Несколько устройств, использующих один и тот же канал, образуют пикосеть (piconet), при этом одно из устройств работает как ведущее (Master), а остальные — как подчиненные (Slave). Для определения модели поведения при установлении соединения между различными типами устройств вводится понятие «профиль», означающее набор функций и возможностей, которые использует Bluetooth в качестве механизма транспортировки. В быту подобная технология является удобным способ соединения домашней и офисной электроники. В промышленных системах эта технология все чаще используется для замены проводов в интерфейсе RS-232. Радиоудлинители на базе Bluetooth-модулей (см. Рисунок 1в) с поддержкой SPP позволяют организовать «прозрачную» передачу данных по последовательному

протоколу и быстрый ввод/вывод данных и сигналов управления в режиме реального времени[3]. Технология Bluetooth использует метод расширения спектра скачкообразным изменением частоты (FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum). Выделенный частотный диапазон разбивается на 79 каналов, переключение которых происходит 1600 раз в секунду. Такой механизм позволяет быстро отстроиться от помех даже в сложной обстановке промышленного производства, обеспечив надежную и предсказуемую передачу данных. Кроме того, такой метод расширения спектра позволяет использовать параллельно множество Bluetooth-устройств. В настоящее время существует возможность функционирования десяти независимых Bluetooth-каналов передачи информации и одной сети WLAN, расположенных в единой зоне покрытия [4].

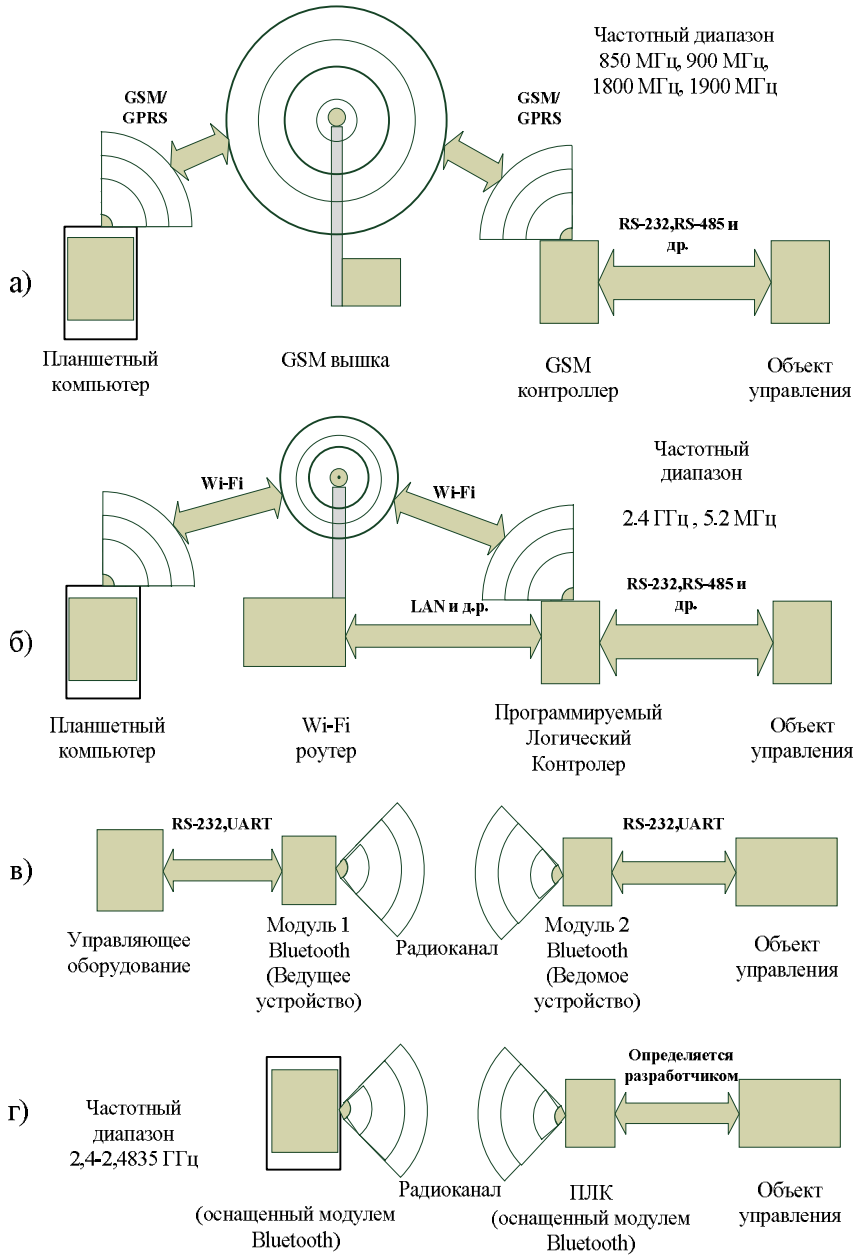


Рисунок 1 – Примеры функциональных схем систем управления различных решений: а) со стандартом GSM; б) со стандартом Wi-Fi; в) со стандартом Bluetooth по схеме «ведущий-ведомый»; г) со стандартом Bluetooth по схеме «точка-точка».

В настоящее время существует стандарт Bluetooth 4.0, который предоставляет скорость передачи данных в 1 Мбит/с при размере пакета данных 8—27 байт, устанавливать соединение менее чем за 5 миллисекунд и поддерживать его на расстоянии до 100 м. Наиболее распространённым на данный момент является Bluetooth 3.0. Скорость передачи данных достигает 24 Мбит/с.

Модули Bluetooth обеспечивают надежную передачу информации в условиях высокого уровня электромагнитного излучения различной природы, имеют низкую цену, невысокое энергопотребление, просты в использовании. Они позволяют получать удаленный доступ к устройствам и механизмам, проводная связь с которыми невозможна или затруднена. Bluetooth уже встроен во многие современные устройства — ноутбуки, КПК, телефоны, и имеет встроенную поддержку в наиболее распространенных операционных системах. Это дает возможность легко интегрировать данную технологию в создаваемые беспроводные системы управления и сбора информации.

Под аббревиатурой Wi-Fi (от английского словосочетания Wireless Fidelity, беспроводная точность) в настоящее время развивается целое семейство стандартов передачи цифровых потоков данных по радиоканалам. Обычно схема Wi-Fi сети содержит не менее одной точки доступа и не менее одного клиента. Также возможно подключение двух клиентов в режиме точка-точка, когда точка доступа не используется, а клиенты соединяются посредством сетевых адаптеров «напрямую». Точка доступа передаёт свой идентификатор сети (SSID (англ.) русск.) с помощью специальных сигнальных пакетов на скорости 0,1 Мбит/с каждые 100 мс. Поэтому 0,1 Мбит/с – наименьшая скорость передачи данных для Wi-Fi (максимальная для стандарта 802.11n – 600 Мбит/с). Зная SSID сети, клиент может выяснить, возможно ли подключение к данной точке доступа. При попадании в зону действия двух точек доступа с идентичными SSID приёмник может выбирать между ними на основании данных об уровне сигнала.

Стандарт Wi-Fi имеет следующие преимущества:

–позволяет развернуть сеть без прокладки кабеля, что может уменьшить стоимость развёртывания и/или расширения сети. Места, где нельзя проложить кабель, например, вне помещений и в зданиях, имеющих историческую ценность, могут обслуживаться беспроводными сетями.

–позволяет иметь доступ к сети мобильным устройствам;

–Wi-Fi устройства широко распространены;

–мобильность;

–в пределах Wi-Fi зоны в сеть Интернет могут выходить несколько пользователей с компьютеров, ноутбуков, телефонов и т. д;

–излучение от Wi-Fi устройств в момент передачи данных на порядок (в 10 раз) меньше, чем у сотового телефона.

Основным недостатком Wi-Fi является его подверженность помехам, поэтому дальность стабильной работы зависит от расстояния, от мощности антенны, чистоты частотного канала и наличия устройств создающих «наводки», искажающие сигнал. Пример построения системы с использованием Wi-Fi пока-

зан на рисунке 1б. Данная технология использована для построения системы на примере учебного стенда с промышленным оборудованием фирмы OMRON [2].

Описанные в статье технологии могут использоваться для решения таких задач как: передача сигнала сигнализации, значений расхода электроэнергии, тепла и топлива; дистанционное управление технологическим управлением; протоколирование событий и д.р. Использование планшетных компьютеров с рассмотренными стандартами связи и вариантами приведенных систем, позволяет сократить затраты на автоматизацию, а также время наладки и ремонта автоматизированных производственных линий.

УДК 621.316.79

Д.А. БАДУГИН, Е.В. БЫЧКОВ, А.Б. ДАРЬЕНКОВ, В.Л. МЕЛЬНИКОВ, В.В. СОКОЛОВ

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ЗАДАТЧИКА ЭКОНОМИЧНГО РЕЖИМА ВЕТРО-ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен вариант построения испытательного стенда для разработки и отладки оптимальных алгоритмов задатчика экономичного режима гибридной автономной ветро-дизель-электрической станции.

Ключевые слова: ветрогенератор, управление, дизель, электростанция, задатчик экономичного режима.

Одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики и решения экологических проблем Российской Федерации является использование возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения. Разработка подобных программ целесообразна не только в общепромышленном, но также и в локальном масштабе, на уровне коттеджа, небольшой фермы или предприятия, научно-исследовательской станции [1].

Основной принцип использования возобновляемых источников энергии предполагает извлечение энергии из процессов, постоянно происходящих в окружающей среде. Одним из наиболее динамично развивающихся видов возобновляемых источников энергии в мире выступает ветроэнергетика. С географической и метеорологической точки зрения не вся территория РФ является благоприятной для эффективного (крупномасштабного) использования ветроэнергетики. В природной зоне центральной России в условиях существенной нестабильности ветровых процессов затруднительно поддерживать номинальные параметры работы возобновляемых энергетических установок [2]. Поэтому, более целесообразным представляется использование гибридных установок, ко-

торые содержат наряду с возобновляемыми компонентами модули, работающие на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и устройства сопряжения с сетью.

При объединении гетерогенных (разнородных) источников энергии в пределах одного комплекса возникает задача сопряжения различных узлов генерации и их эффективного использования.

Решение такой задачи возможно на основе единого управляющего устройства. которое выполняет функции подключения модулей к внутренней шине постоянного тока, корректирует работу преобразовательных устройств и реализует оптимальный алгоритм подачи топлива в дизель-генераторную установку – задатчика экономичного режима (ЗЭР) [3].

Для синтеза оптимальных алгоритмов работы ЗЭР, а также изучения и оценки особенностей взаимодействия между разными автономными генерирующими установками авторами разработан испытательный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

В состав испытательного стенда входят: ветро - и дизель-генераторные установки и их имитаторы, построенные на базе генераторов переменного тока (СГ1 и СГ2), приводные асинхронные двигатели (АД1 И АД2) и преобразователей частоты (ПЧ1 и ПЧ2) для изменения частоты вращения генераторов. Суммирование потоков энергии генераторов осуществляется на шине постоянного тока, к которой подключена аккумуляторная батарея (АКБ) [3].

Суммирование энергий генераторов переменного тока, работающих с переменными частотами вращения, осуществляется с помощью преобразователей переменного напряжения в постоянное (П1 – П4). Общее управление стендом обеспечивает программируемый логический контроллер (ПЛК), который формирует управляющие сигналы на основании информации от датчиков тока (мощности) и напряжения (частоты вращения) [4]. Экономичную работу ДВС дизель-генераторной установки обеспечивает ЗЭР, использующий информацию о частоте вращения, потребляемой нагрузкой мощности и расходе топлива [5]. Трехфазное переменное напряжение (380 В, 50 Гц) формируется автономным инвертором, к которому подключаются нагрузка (активная и активно-индуктивная).

Алгоритм ЗЭР должен обеспечивать, в первую очередь, максимальное использование энергии от ветро-генератора, и восполнение дефицита мощности за счет дизель-генераторной установки.

Испытательный стенд может работать в нескольких режимах.

1. Режим работы двух имитаторов предназначен для апробирования алгоритмов управления ветро-дизель-электростанции и предварительной настройки ЗЭР. В этом режиме энергия на шины постоянного тока поступает с имитаторов ветро- и дизель-генераторных установок. Сигнал управления ПЧ1 (Uy1) имитатора ДГУ формируется в ПЛК на основе обработки сигнала, получаемого от имитатора ветроэнергетической установки.

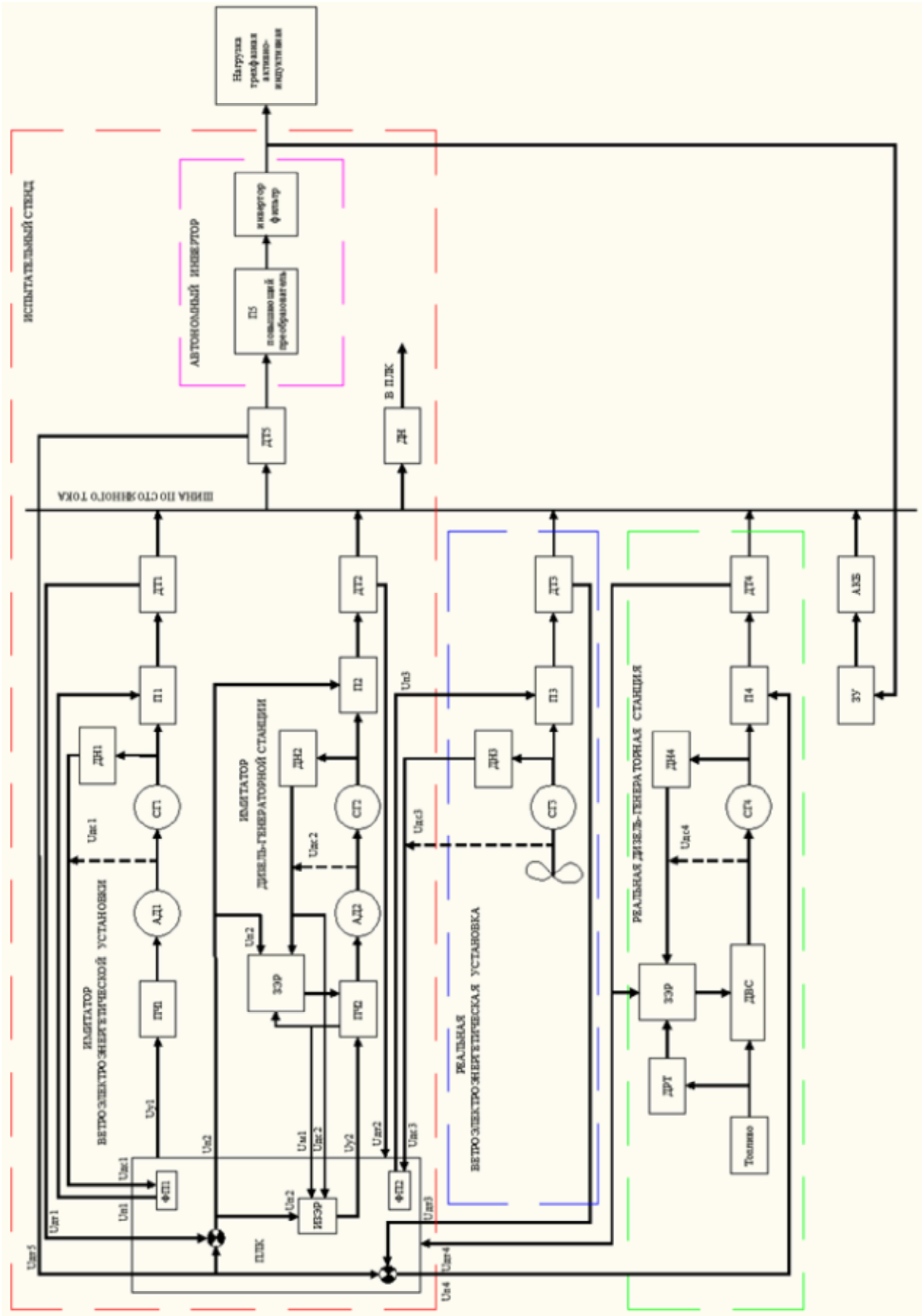


Рис. 1. Функциональная схема испытательного стенда

1. Задание необходимой мощности с имитатора ветро-генератора формируется в ПЛК функциональным преобразователем (ФП1) с учетом фактической частоты вращения (ДН1) и нагрузочной характеристики ветро-генератора.

Контроль мощности поступающей энергии от ветро-генератора выполняет датчик тока (ДТ1), сигнал которого поступает в ПЛК и вычитается из сигнала пропорционального мощности, потребляемой с шин постоянного тока (ДТ5). Разностный сигнал используется для формирования потока энергии с дизель-генератора.

Экономичную работу имитатора дизель-генераторной установки обеспечивает либо ЗЭР либо его имитатор (ИЗЭР), реализованный на основе ПЛК. При формировании сигнала на частоту вращения имитатора ДГУ (АД2-СГ2) учитывается: сигнал задания на мощность, снимаемую с ДГУ, фактическая частота вращения и потребляемая ПЧ2 электрическая энергия [6].

2. Режим работы имитатора ветро-генератора и реального дизель-генератора позволяет произвести окончательную доводку характеристик ЗЭР с учетом реального расхода топлива, измеряемого датчиком расхода топлива (ДРТ) и режимов работы сервопривода перемещения топливной рейки ДГУ, регулирующей его подачу.

3. Режим работы реальных ветро- и дизель-генераторов на окончательном этапе разработки должен подтвердить правильность предложенных алгоритмов управления, а также теоретические расчеты экономичности и энергетической эффективности ветро-дизель-электрической станции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения.

В рассмотренных режимах работы суммирование потоков энергии агрегатов на шине постоянного тока обеспечивают преобразователи переменного напряжения в постоянное необходимого уровня (П1-П4). Преобразователи работают в режиме источника тока и содержат входной выпрямитель, емкостной фильтр, импульсный преобразователь постоянного тока (понижающий или повышающий).

Автономный инвертор формирует трехфазное переменное напряжение частотой 50 Гц и построен на базе полумостового повышающего преобразователя П5, 3-х фазного инвертора и выходного фильтра. Для формирования синусоидальных напряжений в трехфазном инверторе реализован алгоритм векторной ШИМ. Двухступенчатый последовательно-параллельный резонансный LC-фильтр на выходе обеспечивает формирование синусоидальных напряжений с низким коэффициентом нелинейных искажений.

В настоящее время на кафедре «Электрооборудование, электропривод и автоматика» института электроэнергетики НГТУ создается экспериментальный образец ЗЭР и испытательный стенд ЗЭР ветро-дизель-электрической станции мощностью 1 кВт.

Библиографический список

1. **Филиппов С.П.** Малая энергетика в России // Теплоэнергетика, 2009, № 8, с. 38-44.

2. **Васенин А.Б., Серебряков А.В., Титов В.Г.** Имитационная модель автономной ветро-дизельэнергетической установки. Труды МНТК «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения)/ Иваново, ИГЭУ, т.2, 2011.
3. **Дарьенков А.Б., Хватов О.С.** Автономная высокоэффективная электрогенерирующая электростанция // Тр. Нижегородского государственного технического университета. Т. 77, Н. Новгород, 2009. – с. 68-72.
4. **Осадчий Г.Б.** Солнечная энергия, её производные и технологии их использования (Введение в энергетику ВИЭ). Омск: ИПК Макшеевой Е.А., 2010. 572 с.
5. **Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Поляков И.С., Орлов О.И.** Интеллектуальная система управления дизель-генератором переменной скорости вращения. Материалы научно-технической конференции "Актуальные проблемы электроэнергетики". НГТУ, Н.Новгород, 2012 г.
6. **Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Поляков И.С.** Нейросетевой алгоритм системы управления топливоподачей дизель-генератора переменной скорости вращения. Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013 г. выпуск 3.

УДК 621.314

К.А. БИНДА, А.Н. МЕШКОВ, А.С. ПЛЕХОВ, Д.Ю. ТИТОВ

УЧЕТ ПОТЕРЬ И ГЕНЕРИРУЕМОЙ МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье предложен способ повышения точности расчетов установленной мощности преобразователя с учетом гармонических искажений и потерь мощности в электрической машине, а также представлены регрессионные зависимости для этих потерь.

Ключевые слова: мощность искажения, установленная мощность преобразователя, учет потерь, регрессионные зависимости.

Существующие структуры активных фильтров гармоник позволяют использовать их как для устранения искажений сетевого тока и напряжения в узле нагрузки, создаваемых электроприёмниками с нелинейной характеристикой, так и для создания нужного спектра гармоник тока на выходе автономного инвертора, питающего электрическую машину, работающую в режиме создания пульсаций момента, называемую здесь элетромеханическим фильтром.

Мощность искажений, генерируемая для создания виброгасящих пульсаций электромагнитного момента двигателя, либо генератора автономной электростанции, определяется высшими гармоническими составляющими тока. Эта мощность должна быть учтена при нахождении допустимых величин активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети, которые равны соответствующим мощностям на входе активного компенсирующего устройства (АКУ). В

роли АКУ в первом случае выступает автономный инвертор напряжения или тока, питающий приводной двигатель, а во втором случае – генераторный инвертор, обеспечивающий необходимое качество электроэнергии автономной электростанции.

В качестве оценки степени искажений синусоидальной формы тока удобно использовать THD% - Total Harmonic Distortion (Суммарное Гармоническое Искажение):

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{k=\infty} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} 100\%,$$

где $I_{(k)}$ и $I_{(1)}$ – действующие (или амплитудные) значения k-й и 1-й гармоник тока.

В отечественной практике для оценки гармонического состава тока используют коэффициент искажения $K_и$:

$$K_и = \frac{I_{(1)}}{I} \cdot 100\%,$$

где I – действующее значение тока фазы.

THD и $K_и$ в относительных единицах ($THD_{о.е.}$ и $K_{ио.е.}$) связаны соотношением [4]:

$$THD_{о.е.} = \frac{\sqrt{1 - K_{ио.е.}^2}}{K_{ио.е.}}.$$

Компенсация неактивных составляющих мощности и намеренное формирование искажений выходного тока с целью гашения вибраций является одной из форм влияния рассматриваемых преобразователей на сеть. Коэффициент мощности зависит, с одной стороны, от степени регулирования выходного напряжения выпрямителя, с другой стороны, от коэффициента сдвига и коэффициента искажений сетевого тока:

$$k_м = K_и \cos\varphi, \qquad (1)$$

где $K_и = \frac{I_{ф(1)}}{I_ф} = \frac{I_{ф(1)}}{\sqrt{I_{ф(1)}^2 + \sum_{к=2}^{40} I_{ф(к)}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_{о.е.}^2}}$,

$I_{ф(k)}$ - действующее значение k-й гармоники тока.

Мощность искажений, которая является составляющей полной мощности S при несинусоидальной форме тока определяется выражением [2]:

$$T = mU_{ф}\sqrt{\sum_{к=2}^{40} I_{ф(к)}^2} = S_{(1)}\sqrt{\frac{1}{K_и^2} - 1} = S_{(1)}THD_{о.е.},$$

где $S_{(1)} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2}$ - полная мощность первой гармоники.

Таким образом, мощность искажения T с учетом (1):

$$T = UI\sqrt{1 - K_{ио.е.}^2} = S_{(1)}\frac{1}{K_{ио.е.}}\sqrt{1 - K_{ио.е.}^2} = S_{(1)}\sqrt{\frac{1}{K_{ио.е.}^2} - 1} = S_{(1)}THD_{о.е.}.$$

Тогда полная мощность, потребляемая из сети:

$$S = mU_{ф}I_{ф} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + T^2}.$$

Многие авторы, в том числе [3] отмечают, что мощность искажения есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем - α. Однако следует принять во внимание, что высшие гармонические составляющие трудно учитывать, они более подвержены влиянию случайных факторов из-за колебаний напряжения сети и нагрузки. Точное описание искажения тока регулярными функциями практически невозможно, поэтому для характеристики качества преобразования тока достаточно грубых регрессионных оценок.

Для повышения точности расчетов установленной мощности АКУ необходимо, помимо расчетов мощности гармонических искажений, рассчитывать приблизительное значение потерь мощности в электрической машине, например, в электродвигателе:

$$S_{уст} \geq \sqrt{Q(\alpha)_{(1)}^2 + P(\alpha)_{(1)}^2 + (S_{уст} \cdot THD(\alpha)_{о.е.})^2 + \Delta P^2},$$

где ΔP - суммарные потери в асинхронном двигателе.

Для определения суммарных потерь в асинхронном двигателе выполнен расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основании каталожных данных по методике В.Я. Беспалова [6].

Для расчета была использована серия асинхронных электродвигателей серии 4А со степенью защиты IP44, способ охлаждения ICA0141. Расчеты были проведены для двигателей: 4А180S2Y3 мощностью 22 кВт, 4А255М2Y3 - 55 кВт, 4А280S2Y3 - 110 кВт, 4А3155S2Y3 - 160 кВт, 4А355S2Y3 - 250 кВт. По результатам расчета построена (рис. 1) поверхность зависимости потерь двигателей от изменения напряжения питания и мощности, потребляемой электрической машиной.

По данным моделирования изменения мощности потерь в зависимости от потребляемой двигателями мощности $P_{нагр}$ и питающего напряжения на статоре двигателя U_1 было определено уравнение регрессии:

$$\Delta P = 42.1654 - 5.11 \cdot U_1 + 5.4853 \cdot P_{нагр} + 0.3144 \cdot U_1^2 - 0.0335 \cdot P_{нагр}^2 .$$

Результаты расчетов по уравнению регрессии представлены на рис. 2.

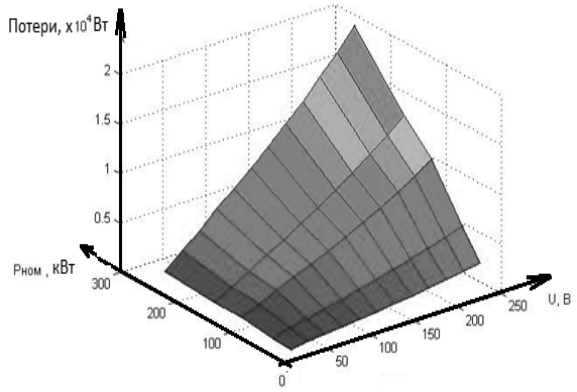


Рисунок 1 - Изменение потерь в двигателе по данным расчета

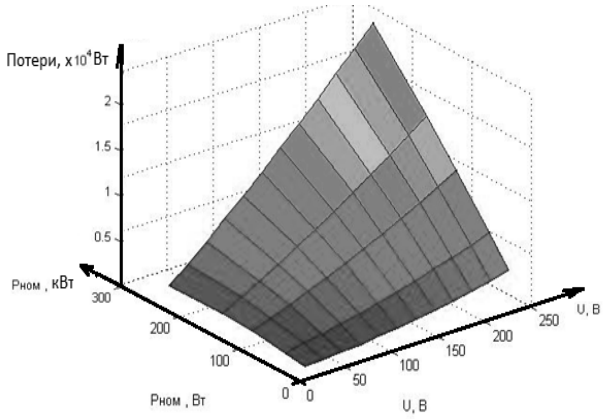


Рисунок 2 - Результаты аппроксимации потерь двигателя

Выводы:

1. Коэффициент мощности полупроводниковых преобразователей в составе регулируемых электроприводов и электротехнологических установок зависит от изменяющихся коэффициентов искажения и сдвига основной гармоники сетевого тока по отношению к гармонике первичного напряжения, а также от потерь питаемого преобразователем двигателя. Представлены регрессионные зависимости для расчета установленной мощности преобразователя.

2. Использование имитационных моделей позволяет получить новую информацию в результате обработки данных о динамических взаимосвязях переменных состояния системы и на этой основе реализовать компьютерное (или компьютационное) управление этой системой.

Библиографический список

1.**Плехов А.С.** Структура и алгоритмы управления энергосберегающих компенсационных преобразователей /А.С. Плехов, В.Г. Титов, К.А. Бинда, Д.Ю. Титов // Вестник ИГЭУ. - 2013. -№ 2. – С. 56-61.

2.**Барсуков И.Б.** Гармонические искажения при работе преобразователей частоты / Барсуков И.Б., Вдовенко Е.В., Цыганов Е.В. // Производственно-технический журнал Главный энергетик. М.:Промиздат, 2011. №6 С. 5-15.

3.**Зайцев А.И.** Силовая промышленная электроника / Плехов А.С., Зайцев А.И. // Воронеж: Научная книга. 2008. - с 231.

4.**Тихомиров В.А.** Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты / Тихомиров В.А., Хватов С.В. // Труды Нижегородского государственного технического университета им Р.Е.Алексеева, 2011. №3. С.201-214.

5.**Титов В.Г.** Нагружающее устройство для исследования энергосберегающего электропривода / Кашканов А.О., Плехов А.С, Титов В.Г. // Актуальные проблемы электроэнергетики. г. Нижний Новгород: НГТУ им Р.Е.Алексеева, 2011. С.55-60.

6.**Баранов П.Р.** Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным приводом тормозного устройства // Известия Томского политехнического университета. 2006, Т309, № 1. с. 159 — 163.

7.**Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий // 4-е издание переработанное и дополненное. М.:,2000. 358 с.

8.**Титов В.Г.** Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями [Электронный ресурс] / В.Г. Титов, А.С. Плехов, К.А. Бинда, Д.Ю. Титов // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона. - 2013. - №4. - Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909

9. **Дмитриев С.М.** Алгоритмы управления активными фильтрами гармоник в составе электроприводов переменного тока // Дмитриев С.М., Плехов А.С. Титов В.Г., Яшин С.Н., Титов Д.Ю. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, 2012. № 2 (95).

УДК 621

Т.Н. УСНУНЦ-КРИГЕР, А.Ю. СМИРНОВ

МОДУЛЯЦИЯ ТОКА ФАЗЫ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова

Эта работа показыывает простой способ, чтобы свести к минимуму пульсации крутящего момента вентильного двигателя (SRM). Методика основана на контроле суммы квадрата тока фазы с помощью только двух датчиков тока и аналоговых множителей. Характеристики регулирования приводов SRM проанализированы для эксплуатации двигателя в линейной области его магнитных характеристик. Даны результаты моделирования и эксперимента предложенного метода. Описаны преимущества и недостатки предлагаемой схемы.

Ключевые слова: пульсации крутящего момента, минимизация, модуляция тока фазы.

Вентильный реактивный двигатель (ВРД) является привлекательной альтернативой в регулируемом приводе, благодаря своей простоте в конструкции двигателя и мощности преобразователя. Чрезмерные пульсации крутящего момента, особенно на низких скоростях до сих пор, является одной из важных причин для ВРД, по которым он неприемлем на рынке в регулируемом приво-

де. Эти пульсации крутящего момента происходят из - за шаговый природы двигателя и имеют нежелательный эффект в системе подшипников и производит акустический шум.

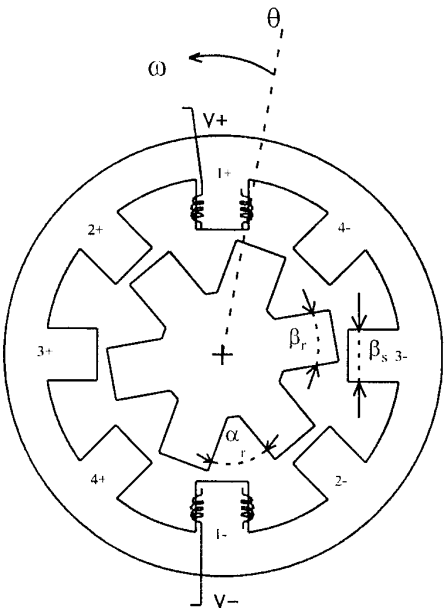


Рис. 1. Поперечное сечение ВРД с 8 полюсами на статоре и 6 полюсами на роторе

В этой статье предлагается простая техника для модуляции тока фазы, чтобы устранить пульсации крутящего момента с помощью только двух датчиков тока. Даны результаты моделирование и эксперимента. Описаны преимущества и недостатки метода.

ВРД имеет явно выраженные полюса на статоре и роторе с катушками, расположенными вокруг полюсов статора и соединенных в диаметрально противоположных парах с образованием фаз электродвигателя, как показано на рисунке 1, где для простоты, катушка только одной фазы была привлечена. Самая популярная схема привода для ВРД является схема коммутации с накопительным конденсатором. Последовательность переключения инвертора контролируется сигналом положения ротора, подаваемого от датчика положения, установленного на валу двигателя.

ВРД, используемый в этом исследовании, является с 8 полюсами на статоре и 6 полюсами на роторе (8/6) с преобразователем. Четыре фазы обмотки двигателя, преобразователь и схема управления показана на рисунке 2.

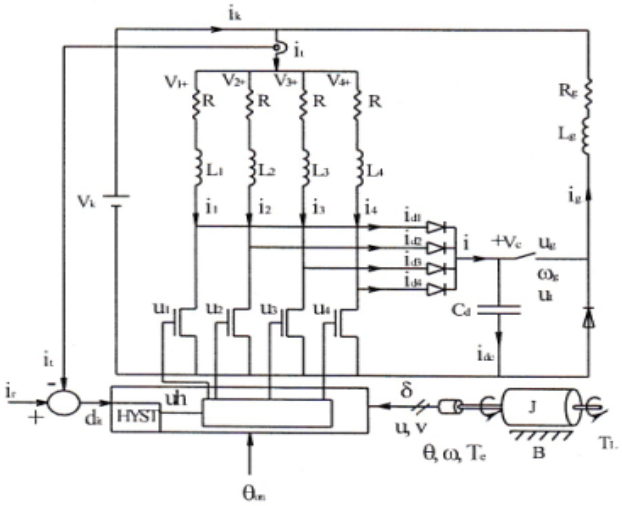


Рис.2. Преобразователь четырех - фазового 8/6 ВРД с цепью управления

Модель ВРД используется в линейной области и пренебрегается взаимной индуктивностью. Уравнения состояния системы написаны с учетом потока фазы, напряжения на конденсаторе, тока индуктивности, скорости вращения вала и угла, и они приведены следующим образом:

$$d\lambda_n / dt = V_n - Ri_n , \quad (1)$$
$$dV_c / dt = (-i_g u_g + i) / C_d , \quad (2)$$
$$di_g / dt = (V_g - R_g i_g) / L_g , \quad (3)$$
$$d\omega / dt = (T_e - T_L - B\omega) J , \quad (4)$$
$$d\theta / dt = \omega , \quad (5)$$

где λ_n - поток n -й фазы, ВБ; i_n - ток n-й фазы, А; V_n - напряжение, n-й фазы, В; R - сопротивление каждой фазы, Ом; V_c - напряжение на конденсаторе, В; T_e - электрический крутящий момент, Н м; i_g - ток в цепи, А; u_g - сигнал управления преобразователем; i - сумма тока, А; C_d - емкость конденсатора, Ф; L_g - индуктивность, Гн; R_g - сопротивление на катушке индуктивности, Ом; ω - угловая скорость, рад / с; θ - положение ротора, рад; T_L - момент нагрузки, Н м; B - коэффициент вязкого трения, Н м с / рад; J - Момент инерции, кг.м^2; V_g - напряжение на катушке индуктивности, В.

Электрический крутящий момент

$$T_e = \sum_{n=1}^{4} \frac{1}{2} \frac{dL_n}{d\theta} i_n^2 , \quad (6)$$

где L_n - это индуктивность фазы.

Следующие допущения в вышеуказанной модели:

1. Взаимные индуктивности между фазами равны нулю.
2. Двигатель работает в линейной области его магнитных характеристик. Форма индуктивности фаз даны на рисунке 3.

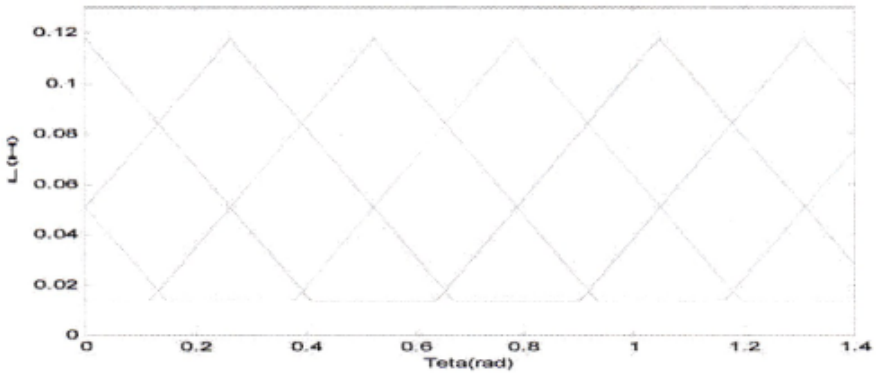


Рис. 3. Форма индуктивности фазы для ВРД

Ток i_n может быть вычислен через поток

$$i_n = \lambda_n / L_n . \tag{7}$$

На практике, источник напряжения используется для управления двигателем и контролируется ток. Это может быть сделано путем контроля суммарного тока, как

$$i_{ref} = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 \tag{8}$$

только с одним текущим преобразователем, как видно по рисунку 2. Изменение крутящего момента, соответствующее токи, индуктивности и их наклоны, которые были получены с помощью моделирования, приведены на рисунках 4 и 5. Математическая модель для расчета приведены в формулах (1) - (7). Для решения уравнений выбрана метод Рунге-Кутта.

Некоторые данные для моделирования:
исходное напряжение V_k = 300 В; напряжение конденсатора: V_c= 600 В; ширина напряжения фазы θ_{on}= 15 °; частота переключения f_g = 10 кГц; номинальный ток i_{ref}=3.2 А; момент нагрузки T_L=2 Н м.

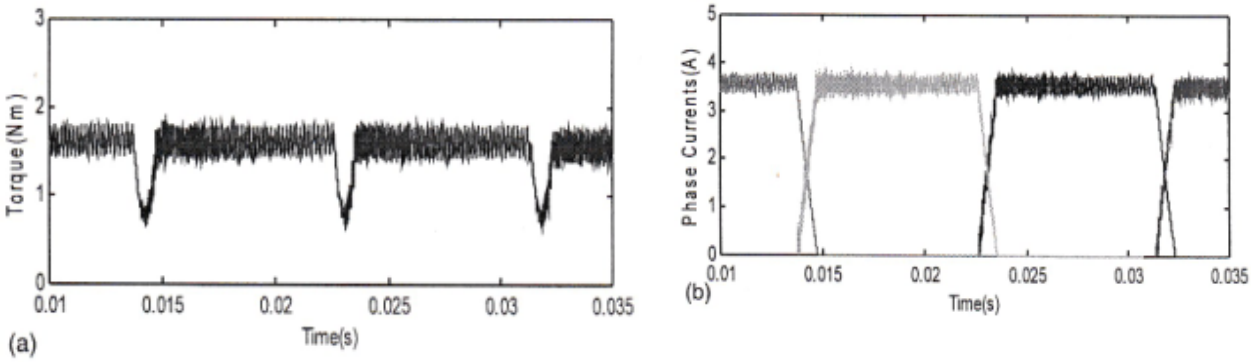


Рис. 4. (а) изменение крутящего момента, (б) изменение тока фазы

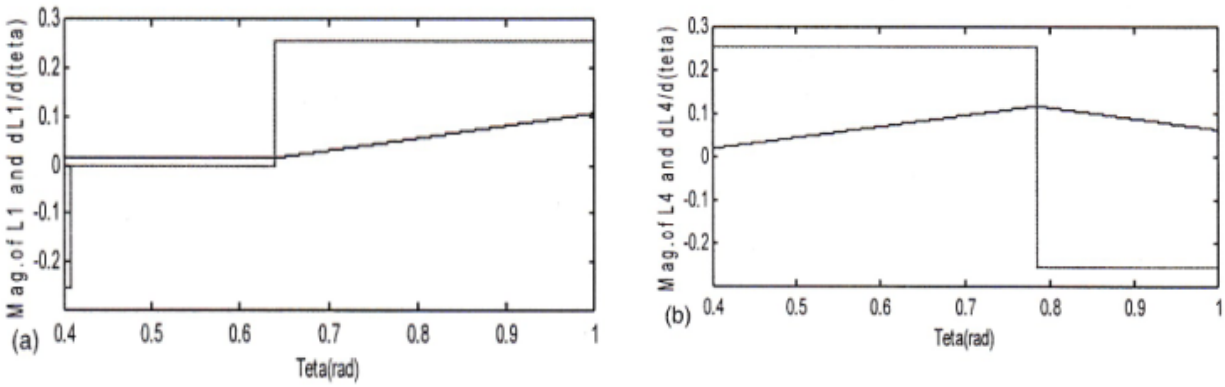


Рис. 5. (а) Индуктивность фаза L1 и ее наклон $dL_1 / d\theta$,
(б) Индуктивность фаза L4 и ее наклон $dL_4 / d\theta$

Падение момента на рис. 4а можно объяснить уравнением (6). Во время коммутации нарастающий фронт фазного тока модулируют, чтобы удовлетворять уравнению. (7). Однако это не делает вращающий момент постоянным.

Обратите внимание на то, что коммутация (от i_4 к i_1) происходит в положительный период вращающего момента и L4 и L1 на рисунках 4 и 5. Таким образом, следующий контроль более логично произвести в соответствии с формулой (6) где крутящий момент пропорционален квадрату токов

$$i_{ref}^2 = i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 . \qquad (9)$$

Предложенный метод основан на уравнении (9). Это управление моделируется с теми же данными, приведенные выше, и результаты показаны на рисунке 6.

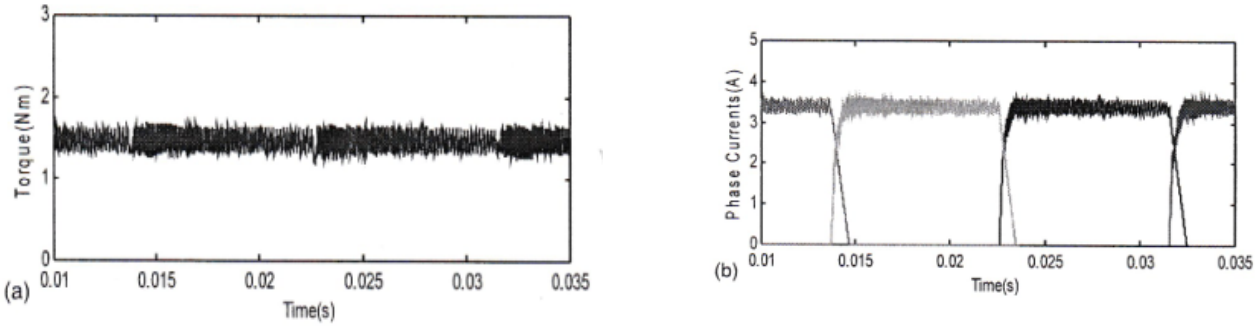


Рис. 6. Результаты моделирования предложенного метода.
(а) изменение крутящего момента, (б) изменение тока фазы

Видно, что падение крутящего момента в значительной мере устранено. Высокая частота пульсаций показано на рисунке происходит от управления тока гистерезиса и может быть сделано как можно меньше за счет уменьшения ширины полосы гистерезиса и увеличивая частоту переключения.

Предполагается, что только две фазы могут провести ток одновременно. Следовательно

$$i_1 i_3 = i_2 i_4 = 0 . \qquad (10)$$

Тогда,

$$(i_1 + i_3)^2 + (i_2 + i_4)^2 = i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 . \qquad (11)$$

Уравнение (10) показывает, что предлагаемое управление может быть сделано с помощью только двух датчиков тока.

Схема для реализации этого управления приведена на рисунке 7.

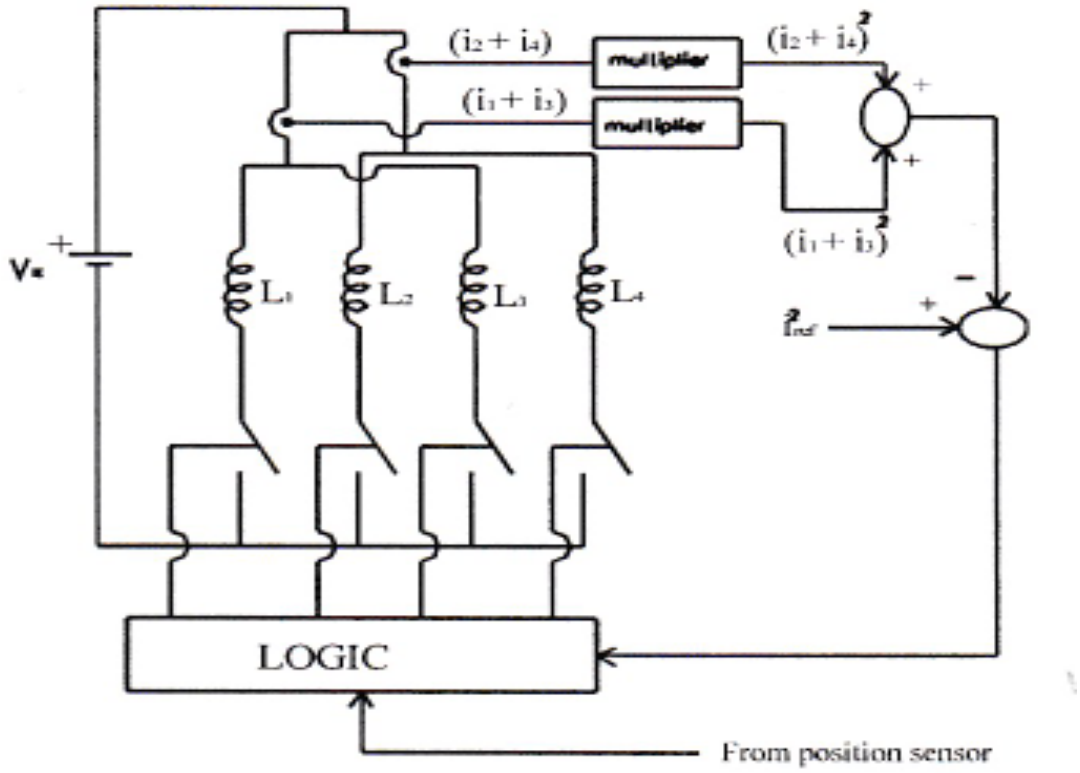


Рис. 7. Схема управления

Выводы

Простая техника дает минимизацию пульсаций крутящего момента ВРД. Предлагаемый способ имеет следующие преимущества:

1. только два датчики тока требуется в применяемом методе;
2. точная оценка угла или измерение не требуется;
3. не требуется справочная таблица или цифровой расчет;
4. не требуется модификация на двигателе или геометрии полюса.

Тем не менее, существуют некоторые ограничения в предложенном методе.

1. в любой момент только одна или две фазы должны проводить ток;
2. индуктивность по сравнению с углом изменения предполагается линейная в положительном периоде крутящего момента.

Библиографический список

1. Nihat Inane. Phase current modulation of switched reluctance motor to minimize torque ripple. // Nihat Inane. Electric Power Systems Research № 61 2002, с. 51-55
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: учебник для вузов /А.В.Иванов-Смоленский - М.: Энергия, 1980, 928с.

УДК 52.505

А.А.БАШЕВ

ВОПРОСЫ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы построения математических моделей и их адекватность реальным объектам относительно выбранной системы характеристик.

Ключевые слова: математическая модель, динамическая система, нелинейная система.

При исследовании сложной динамической системы одной из основных задач является выбор ее математической модели. Переход от изучения объекта непосредственно к изучению его свойств через моделирование обусловлен рядом причин: во-первых, иногда представляет интерес не вся совокупность свойств системы, а лишь их отдельные составляющие, и во-вторых, модель обладает большей доступностью вариацией параметрами и воздействующими факторами на нее. Процесс моделирования обычно включает этапы изучения и выделения существенных характеристик исследуемого объекта и выбор подходящей модели, достаточно полно отражающей его. Ключевым и самым сложным этапом этого процесса является этап выбора подходящей модели, которая, с одной стороны, должна быть достаточно простой, с другой довольно полно отражать исследуемый объект. Важнейшим требованием к математической модели является требование ее адекватности изучаемому реальному объекту относительно выбранной системы его характеристик. Любая математическая модель представляет изучаемый объект лишь в некоторых его свойствах, при этом изучение отдельных свойств моделируемой системы осуществляется ценой отказа от исследования других ее свойств. Многие свойства, которые остаются неучтенными при моделировании, например, из-за того, что они неизвестны, могут в корне изменить картину результатов моделирования, и модель, таким образом, оказывается очень далека от оригинала. Достоверность знания, полученного с помощью моделирования, тем выше, чем полнее аналогия прототипа и модели, поэтому возможности этого метода необходимо рассматривать в связи с тем, какой критерий подобия использовался при создании модели и каким образом она получена. Такой принцип анализа возможностей моделирования особенно необходим тогда, когда прототип и модель являются объектами различной природы. При этом приходится решать задачу идентификации. В данном случае под идентификацией понимается адекватность модели с исследуемым объектом на основе эксперимента, т.е. построение на основании анализа входа и выхода математической модели системы.

Традиционно используемый математический аппарат позволяет адекватно описывать достаточно узкий класс систем, в частности, проблемой является формализация поведения нелинейных объектов.

Наиболее плодотворные результаты по использованию моделей можно получить только в областях с хорошо развитой теоретической структурой [1],[2]. Например, системный подход исходит из признания необходимости изучения объектов как некоторых целостных образований, в которых составляющие их элементы достаточно четко разделены, при этом поведение любого элемента системы влияет на поведение других ее элементов. С его позиций объект исследования рассматривается как сложное образование, специфика которого определяется элементами его структуры и характером отношений и связей между элементами. Данный подход предполагает исследование отдельных сторон объекта не изолированно друг от друга, а в их совокупности, взаимозависимости и взаимообусловленности.

Данная работа посвящена рассмотрению подхода, использующего для описания нелинейных систем функциональные разложения Винера-Вольтерра. Используя ряды Вольтерра, ядра которых представляют собой весовые функции высших порядков, можно получить описание нелинейного объекта, допускающее ясную физическую интерпретацию. Этот метод имеет большое достоинство, связанное с тем, что нелинейная система рассматривается как непосредственное обобщение линейного случая, хотя сам объект может существенно отличаться от линейного. Следует всегда иметь в виду одно важное обстоятельство: принятое математическое описание предопределяет весь круг вопросов, которые можно исследовать в его рамках [3]. В связи с этим не может существовать какой-то единственной модели исследуемого объекта. Существует множество моделей, каждая из которых обладает характерными математическими свойствами, определяемыми используемым аппаратом формализации, и каждая из которых допускает изучение только определенного класса вопросов, связанных со структурой и функционированием моделируемой системы.

Можно сказать, что адекватность модели следует рассматривать только по определенным признакам, характеристикам, принятым за основные. Если эти характеристики явно не указаны, то они должны подразумеваться или, как всегда в прикладном исследовании, они могут уточняться по ходу исследования.

Адекватная модель обычно обладает той или иной побочной адекватностью, т.е. она дает правильное качественное и количественное описание не только характеристик, для которых она была построена, но также и ряда других, независимых характеристик, потребность изучения которых может возникнуть в дальнейшем. Чем выше побочная адекватность, тем выше область применения модели. Побочная адекватность модели повышается с усилением в ней роли известных физических законов и положений математики. Она тем выше, чем модель точнее, глубже отражает реальную картину. Поэтому особой привлекательностью обладают математические модели, элементы которых

имеют отчетливый физический смысл, адекватный физическим закономерностям в изучаемом реальном объекте.

Допущения, принимаемые порой для согласования следствий из той или иной модели с заранее известными свойствами реального объекта, могут сделать эту модель адекватной по этим свойствам, но совершенно неподходящей относительно других важных свойств этого же объекта. Несмотря на это роль подобных моделей может быть очень велика. Модель, адекватная по некоторым характеристикам, одновременно является адекватной и по другим характеристикам, которые могут быть выведены как следствия первых.

Эти соображения по поводу адекватности относятся не только к математическим моделям, но и к любому моделированию, в частности физическому. Физические модели во многих случаях обладают побочной адекватностью уже потому, что фундаментальные физические законы в них выполняются по необходимости.

Если проверка на адекватность моделирования показывает, что она не удовлетворяет предъявленным к ней требованиям и причиной этого является более сложный характер поведения системы, то производится новый выбор математического описания.

Библиографический список

1. **Музыкин, С.Н.** Моделирование динамических систем / С.Н. Музыкин, Ю.М. Родионова // Верхне-Волжское книжное издательство. – Ярославль. 1984.
2. **Эйкхофф, П.** Основы идентификации систем управления / Мир. – Москва. 1975.
3. **Касти, Дж.** Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Мир. – Москва. 1982.

УДК 681.518.5

А.С. СТЕКЛОВ

ХАРАКТЕРНЫЕ ДЕФЕКТЫ СУДОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведен анализ характерных дефектов синхронного генератора в составе судовой электроэнергетической системы. Сформулирован перечень дефектов, позволяющий построить экспертную систему диагностики. Подобный подход позволяет анализировать аварийные ситуации и, следовательно, исключить возможности неконтролируемого выхода из строя генератора, что обеспечит построение более гибкой системы ремонта оборудования.

Ключевые слова: синхронный генератор, дефект.

На современных и вновь строящихся судах в качестве источника переменного тока широкое применение получили бесщёточные синхронные генераторы (БСГ). Это синхронный генератор, у которого в качестве возбудителя используется обращенная электрическая машина переменного тока.

При эксплуатации БСГ большое влияние на ресурс машины оказывает процесс изнашивания деталей. Поэтому рассмотрение основных закономерностей этого процесса и установление зависимости надежности машины от износа или старения ее деталей, лимитирующих ресурс всей машины в зависимости от реальных условий эксплуатации, является важной не только научной, но и практической задачей.

Для решения данной задачи определяют характерные параметры БСГ, которые необходимо контролировать в заданные промежутки времени.

Характерные дефекты судовых синхронных бесщёточных генераторов можно разделить на механические дефекты, электрические и дефекты системы автоматического регулирования напряжения.

Рассмотрим характерные дефекты механической и электрической части синхронных генераторов и причины их вызывающие:

1. Причины перегрева генератора:
- перегрузка генератора;
- загрязнение вентиляционных каналов;
- поступление горячего воздуха в машину.

2. Причины местного нагрева, гудения, появления дыма:
- местные замыкания в обмотке статора.

3. Причины перегрева подшипников:
- загрязнение подшипника посторонними твёрдыми частицами;
- неправильный выбор сорта смазки;
- мал масляный зазор или плохая шабровка вкладыша;
- стальные кольца намагничиваются и прилипают к валу;
- избыток смазки в узле или её отсутствие;
- трение сопряжённых с подшипником деталей;
- дефекты установки и сборки генератора;
- износ или разрушение деталей подшипника.

4. Причины Повышенной вибрации машины:
- нарушены центровки валов приводного двигателя и генератора, неисправность соединительной муфты;
- разрушение деталей подшипника;
- овальность шеек вала;
- недостаточная жёсткость фундамента;
- межвитковое или короткое замыкание в обмотке ротора.

5. Причины работы генератора с повышенным шумом:

- отсутствие смазки в подшипниках;
- увеличение зазоров в подшипниках;
- разрушение деталей подшипников;
- ослабление крепления генератора с приводным двигателем, износ прокладок;
- неравномерный воздушный зазор;
- задевание крылатки за корпус машины.

6. Причины невозбуждения генератора:
- частота вращения генератора ниже номинальной;
- генератор размагничен (после длительного бездействия или глухих КЗ в цепи статора, при неправильном подключении обмотки ротора после разборки и осмотра);
- обрыв в обмотке возбуждения или в её цепи;
- неправильное положение реостата ручной регулировки напряжения;
- сигнал по каналу напряжения недостаточен либо его нет;
- неисправность корректора напряжения;
- неисправен блок силового выпрямителя;
- межвитковое или короткое замыкание в обмотке возбуждения (сопровождается повышенной вибрацией генератора).

7. Причины номинального напряжения статора генератора :
- частота вращения генератора ниже номинальной;
- неправильное положение ручного регулятора напряжения;
- величина тока на выходе корректора напряжения не соответствует требуемому значению;
- увеличение прямого сопротивления блока силового выпрямителя;
- неисправность обмоток генератора.

8. Причины повышенного напряжения генератора при работе без нагрузки:
- частота вращении генератора выше номинальной;
- неправильное положение ручного регулятора напряжения;
- корректор напряжения настроен неправильно;
- отсутствие сигнала на выходе корректора напряжения;
- нарушение изоляции шпилек дросселя или компаундирующего трансформатора.

9. Причины резкого снижения напряжения генератора при включении нагрузки:
- неисправность первичного двигателя либо его регулятора;
- перегрузка генератора;
- нарушение настройки канала тока или витковое замыкание во вторичной обмотке трансформатора тока;
- неправильное подключение канала тока по отношению к каналу напряжения.

Сбор информации предложенный в данной статье позволит построить современную экспертную систему диагностирования с использованием непрерывной автоматической диспетчеризации и диагностики по электрическим па-

раметрам БСГ, которая позволит оптимизировать материально-технические затраты и уменьшить потери, обусловленные плановыми простоями и необходимостью проведения внеплановых ремонтов. Кроме того, такая система позволит предотвратить аварийные ситуации, которые влекут за собой долгосрочные ремонты оборудования или его полный выход из строя, не говоря уже об опасности, которую представляет серьезная авария на транспорте.

Библиографический список

1. Морское агентство Транс-Сервис [Электронный ресурс] http://www.trans-service.org/ru.php
2. Блог электромеханика: [Электронный ресурс] // http://www.electroengineer.ru/2011/05/blog-post_23.html

УДК 681.518.5

А.С. СТЕКЛОВ, Е.А. ЕРШОВА

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе анализируются вопросы применения экспертных оценок для обработки результатов диагностирования судовых электроэнергетических систем. Сформулированы основные правила построения алгоритмов, обеспечивающих на основе базы данных построения интеллектуальной системы, оценки надежности энергетических систем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, экспертная система, база знаний.

В системах искусственного интеллекта (ИИ) и в экспертных системах (ЭС), в частности, решаются, как правило, неформализованные задачи, то есть ЭС и системы ИИ не отвергают и не заменяют традиционного подхода к разработке программ, ориентированного на решение формализованных задач (например, проблем обработки данных, проектирования или научных расчетов). Вместо последовательного программирования с заранее создаваемыми программами ИИ предполагает динамическое формирование программы из накопленных в памяти компьютера фактов, навыков и правил, которые И применяется в конкретной ситуации.

ЭС используются для решения так называемых неформализованных задач, общим для которых является то, что:

- задачи не могут быть заданы в числовой форме;
- цели нельзя выразить в терминах точно определённой целевой функции;
- не существует алгоритмического решения задачи;
- если алгоритмическое решение есть, то его нельзя использовать из-за ог-

раниченности ресурсов (время, память).

Неформализованные задачи обычно обладают следующими характеристиками:

- ошибочность, неоднозначность, неполнота и противоречивость исходных данных;
- ошибочность, неоднозначность, неполнота и противоречивость знаний о проблемной области и о решаемой задаче;
- большая размерность пространства решения, то есть перебор при поиске решения весьма велик;
- динамически изменяющиеся данные и знания.

Экспертная система - это программное средство, использующее экспертные знания для обеспечения высокоэффективного решения неформализованных задач в узкой предметной области. Основу ЭС составляет база знаний (БЗ) о предметной области, которая накапливается в процессе построения и эксплуатации ЭС. Накопление и организация знаний - важнейшее свойство всех ЭС.

Знания являются явными и доступными, что отличает ЭС от традиционных программ, и определяет их основные свойства, такие, как:

- применение для решения проблем высококачественного опыта, который представляет уровень мышления наиболее квалифицированных экспертов в данной области, что ведёт к решениям творческим, точным и эффективным;
- наличие прогностических возможностей, при которых ЭС выдаёт ответы не только для конкретной ситуации, но и показывает, как изменяются эти ответы в новых ситуациях, с возможностью подробного объяснения каким образом новая ситуация привела к изменениям;
- обеспечение такого нового качества, как институциональная память, за счёт входящей в состав ЭС базы знаний, которая разработана в ходе взаимодействий со специалистами организации, и представляет собой текущую политику этой группы людей. Этот набор знаний становится сводом квалифицированных мнений и постоянно обновляемым справочником наилучших стратегий и методов, используемых персоналом. Ведущие специалисты уходят, но их опыт остаётся;
- возможность использования ЭС для обучения и тренировки руководящих работников, обеспечивая новых служащих обширным багажом опыта и стратегий, по которым можно изучать рекомендуемую политику и методы.

Основой любой ЭС является совокупность знаний, структурированная в целях упрощения процесса принятия решения. Для специалистов в области искусственного интеллекта термин знания означает информацию, которая необходима программе, чтобы она вела себя "интеллектуально". Эта информация принимает форму фактов и правил. Факты и правила в ЭС не всегда либо истинны, либо ложные. Иногда существует некоторая степень неуверенности в достоверности факта или точности правила. Если это сомнение выражено явно, то оно называется "коэффициентом доверия".

Коэффициент доверия — это число, которое означает вероятность или сте-

пень уверенности, с которой можно считать данный факт или правило достоверным или справедливым.

Как правило, современная экспертная система содержит следующие компоненты:

- подсистему приобретения знаний;
- базу знаний;
- механизм вывода;
- рабочую память;
- интерфейс пользователя;
- подсистему объяснения;
- подсистему совершенствования вывода.

Среда разработки используется создателями ЭС для введения и представления экспертных знаний, а среда консультации доступна пользователям (не экспертам) для получения экспертных знаний и советов.

Приобретение знаний - это сбор, передача и преобразование опыта решения проблем из некоторых источников знаний в компьютерные программы при их создании или расширении (потенциальные источники знаний - люди-эксперты, учебники, базы данных, исследовательские отчеты, собственный опыт пользователей).

База знаний содержит два основных элемента - факты (данные) из предметной области и специальные эвристики или правила, которые управляют использованием фактов при решении проблем.

Механизм вывода – это управляющая структура ЭС. Известна также как интерпретатор правил (в ЭС, основанных на правилах). Это компьютерная программа, управляющая использованием системных знаний посредством формирования и организации последовательности шагов, предпринимаемых для решения проблемы (так называемой “повестки”).

Составляющие механизма вывода:

- интерпретатор (обычно интерпретатор правил) выполняет выбранную повестку, применяя соответствующие правила из базы знаний;
- планировщик управляет процессом выполнения повестки, оценивая эффект применения различных правил с точки зрения приоритетов или других критериев.

Рабочая память служит для хранения данных, полученных от пользователя, и промежуточных данных, выведенных в ходе работы системы.

В процессе решения задачи ЭС запрашивает у пользователя факты, касающиеся конкретной ситуации (проблемы). Получив ответы, ЭС пытается вывести заключение (рекомендацию). Эта попытка выполняется механизмом вывода, решающим, какая стратегия эвристического поиска должна быть использована применительно к данной проблеме. Пользователь может запросить объяснение поведения ЭС и объяснение ее заключений. Качество вывода определяется методом, выбранным для представления знаний, объемом базы знаний и мощностью механизма вывода.

Преимущества использования экспертных систем

Преимуществами и положительными качествами искусственной компетенции являются:

- её постоянство. Человеческая компетенция ослабевает со временем. Перерыв в деятельности человека-эксперта может серьёзно отразиться на его профессиональных качествах.

- простота передачи или воспроизведения. Передача знаний от одного человека другому — долгий и дорогой процесс. Передача искусственной информации — это простой процесс копирования программы или файла данных.

- устойчивость и воспроизводимость результатов. Эксперт-человек может принимать в тождественных ситуациях разные решения из-за эмоциональных факторов. Результаты ЭС — стабильны.

- стоимость. Эксперты, особенно высококвалифицированные обходятся очень дорого. ЭС, наоборот, сравнительно недороги. Их разработка дорога, но они дёшевы в эксплуатации.

Основные режимы работы экспертных систем

В работе ЭС можно выделить два основных режима: режим приобретения знаний и режим решения задачи (режим консультации или режим использования). В режиме приобретения знаний общение с ЭС осуществляет эксперт (при помощи инженера знаний).

Используя компонент приобретения знаний, эксперт описывает проблемную область в виде совокупности фактов и правил. Другими словами, "наполняет" ЭС знаниями, которые позволяют ей самостоятельно решать задачи из проблемной области.

Этому режиму при традиционном подходе к программированию соответствуют этапы: алгоритмизации, программирования и отладки, выполняемые программистом. Таким образом, в отличие от традиционного подхода в случае ЭС разработку программ осуществляет не программист, а эксперт, не владеющий программированием.

В режиме консультаций общение с ЭС осуществляет конечный пользователь, которого интересует результат и (или) способ его получения. Необходимо отметить, что в зависимости от назначения ЭС пользователь может:

- не быть специалистом в данной предметной области, и в этом случае он обращается к ЭС за результатом, который не умеет получить сам;

- быть специалистом, и в этом случае он обращается к ЭС с целью ускорения получения результата, возлагая на ЭС рутинную работу.

Следует отметить, что в отличие от традиционных программ ЭС при решении задачи не только исполняют предписанную алгоритмом последовательность операций, но и сама предварительно формирует её.

Хорошо построенная ЭС имеет возможность самообучаться на решаемых задачах, пополняя автоматически свою БЗ результатами полученных выводов и решений.

ЭС разработаны с тем, чтобы вести себя как эксперты. Они, как правило, дают правильные ответы, но иногда, как и люди, способны ошибаться.

Традиционные программы для решения сложных задач, тоже могут делать

ошибки. Но их очень трудно исправить, поскольку алгоритмы, лежащие в их основе, явно в них не сформулированы. Следовательно, ошибки нелегко найти и исправить. ЭС, подобно людям, имеют потенциальную возможность учиться на своих ошибках.

Библиографический список

1. **Джозеф Джарратано, Гари Райли** «Экспертные системы: принципы разработки и программирование»: Пер. с англ. — М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. — 1152 стр. с ил.
2. **Питер Джексон** Введение в экспертные системы = Introduction to Expert Systems. — 3-е изд. — М.: Вильямс, 2001. — С. 624.
3. **Уотермен Д.** "Руководство по экспертным системам: Пер. с англ. под ред. В. Л. Стефанюка. — М.: «Мир», 1989: — 388 стр. с ил.

УДК 621

А.С. РЕПИН, В.В. ГУЛЯЕВ, А.А. КРАЛИН

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВС) С ДИСКРЕТНО–ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Волжская государственная академия водного транспорта
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен один из вариантов реализации электростартерной системы пуска ДВС, с импульсным преобразованием энергии постоянного тока, передаваемой от автономного источника в нагрузку и с дискретным регулятором напряжения на входе. Проанализированы динамические характеристики замкнутой системы по току якоря. Выполнено сравнение качественных и интегральных показателей переходного режима пуска по отношению к режиму прямого пуска ДВС с целью расчета и выбора ее основных элементов.

Ключевые слова: Электростартерный пуск ДВС, дизель-генераторные установки, ШИМ–контроллер, стартерная батарея.

Электростартерный пуск ДВС транспортных средств и стационарных дизель-генераторных установок (ДГУ) автономных электростанций протекает в жестких условиях эксплуатации: строго лимитирован по времени, нормируется по количеству пусков без промежуточной подзарядки стартерной батареи (количеству неудачных попыток запуска), может протекать в условиях пониженных температур, когда резко ухудшаются пусковые качества самого ДВС. Перечисленные условия предъявляют в отношении надежности пуска повышенные требования к системе стартерного электропривода.

Для обеспечения гарантированного запуска требуемая мощность системы электростартерного пуска часто завышается, а электрическая емкость аккумуляторной стартерной батареи (СБ) становится избыточна. Такой подход к выбору мощности небезосновательно обусловлен тем, что в начальный момент пуска ток разряда стартерной батареи максимален и может в разы превышать значение тока в установившемся режиме прокрутки вала ДВС. На этапе раскрутки вала ДВС до пусковой частоты вращения наибольшее значение отбираемой от батареи мощности наблюдается, когда вал ДВС преодолевает состояние покоя, отрываясь от «мертвой точки». Поэтому требуемую мощность системы пуска определяют, опираясь на наиболее нагруженный, тяжелый режим ее работы.

Кроме этого нецикличные разряды стартерной батареи большой глубины и малой длительности вызывают интенсивный износ и старение ее элементов, в результате чего ее срок службы сокращается, а электрическая емкость падает. Снятию этих недостатков в значительной степени способствует переход от разомкнутой системы электростартерного пуска к замкнутой, где регулируемой координатой выступает ток разряда стартерной батареи или ток якоря стартерного двигателя (СД).

Чувствительным элементом системы является датчик тока (шунт), установленный в цепи разряда стартерной батареи, регулятор – прерыватель (IGBT–ключ) в цепи якоря СД. Для придания системе дополнительных динамических свойств на входе силовой цепи предлагается установить дискретный регулятор уровня подводимого к нагрузке напряжения.

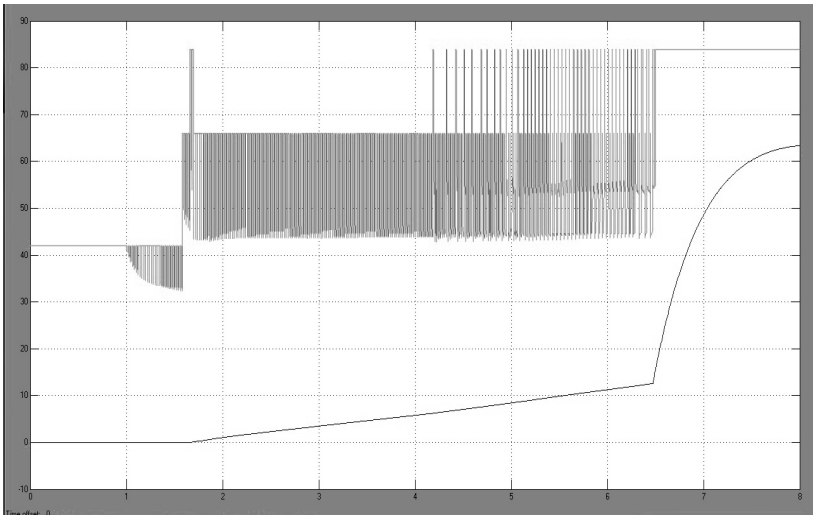
Данный регулятор представляет собой коммутационное устройство, позволяющее формировать структуру стартерной батареи в виде параллельного, последовательного или последовательно-параллельного соединения ее отдельных ветвей. Причем на начальном этапе пуска ветви включаются параллельно в целях увеличения электрической емкости источника и обеспечения пуска при пониженном напряжении, что способствует эффективному отрыву вала из мертвой точки покоя. На втором этапе секции включаются последовательно-параллельно, обеспечивая эффективный разгон ДВС до пусковой частоты вращения. На заключительном этапе разгона ветви включаются последовательно, позволяя снизить ток потребления.

Дополнив дискретный регулятор напряжения обратной связью по току с адаптивным ШИМ–контроллером, можно реализовать систему, обеспечивающую плавный и безударный пуск ДВС за регламентированное время. Для регулирования тока разряда СБв процессе пуска контроллер формирует импульсы подводимого к СД напряжения переменной скважности и амплитуды. Скважность импульсов является функцией тока разряда, а выбираемый дискретный уровень напряжения – функцией темпа его нарастания, т. е. является функцией первой производной от тока якоря.

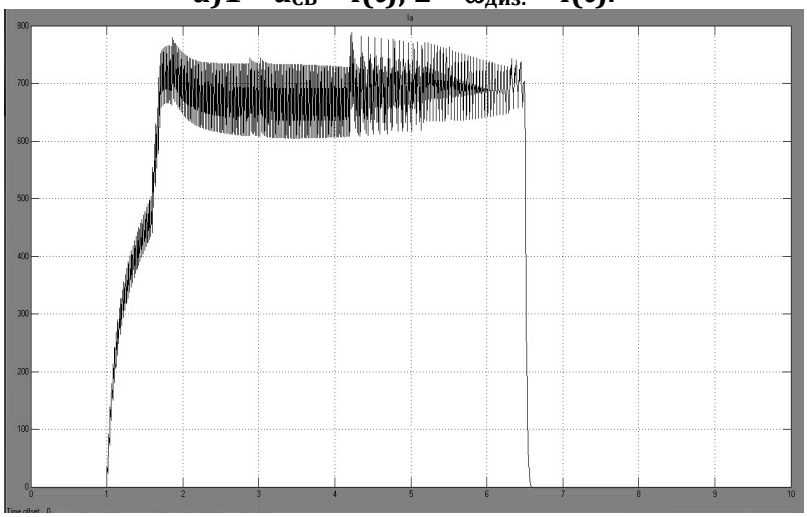
Такая структура регулирования позволяет осуществлять не только удержание тока разряда в заданном допустимом диапазоне во время разгона ДВС до пусковой частоты вращения, но и эффективно ограничивать колебания тока на

первоначальном этапе пуска, когда темп его нарастания высок, а регулирование только за счет изменения скважности не дает нужного результата. Сочетая положительные свойства обоих регуляторов становится возможным осуществить плавный запуск ДВС за нормируемое время и практически без перерегулирования в контуре тока разряда СБ.

Динамические характеристики такой системы для дизеля K6S310DR мощностью 1МВт представлены на рис. 1. Напряжение на внешних зажимах СБ формируется в функции скорости изменения тока разряда и принимает в процессе пуска 3 дискретных значения (42, 66 и 84 В), за счет переменной структуры источника (коммутации ветвей).Начальный этап пуска протекает при пониженном напряжении, что обеспечивает более плавное нарастание тока разряда и исключение броска тока, по сравнению со штатной схемой прямого пуска. На последующем этапе раскрутки вала ДВС процесс пуска сопровождается переключениями между средним и наибольшим уровнями питающего СД напряжения.



а)1 – $u_{СБ}$ = f(t); 2 – $\omega_{диз.}$ = f(t).



б)$i_{СБ}$= f(t).

Рис. 1. тахограмма пуска

Кроме этого, на всем протяжении пускового процесса ШИМ–контроллер тока формирует импульсы переменной скважности для стабилизации тока в заданном диапазоне.

Из тахограммы пуска хорошо видно, что последний протекает практически при линейном нарастании угловой скорости коленвала ДВС. Такой закон формирования угловой скорости вала ДВС способствует резкому снижению пиковых значений динамических моментов и угловых ускорений, обеспечивая плавный, безударный и надежный запуск ДВС в работу.

Максимальное значение тока разряда СБ, а следовательно и тока якоря СД, в предлагаемой системе не превышает 795 А, против 1808 А в штатной схеме прямого пуска. Это соответствует разгрузке СБ по пиковому значению ее тока разряда на 44 %, при одновременном снижении скорости нарастания тока разряда более чем в 5 раз. При этом время пуска составляет 5,5 с, против 1,06 с в штатной схеме, в режиме прямого включения.

Выполненный анализ полученных характеристик позволяет сделать вывод о высокой эффективности предлагаемой системы, как с точки зрения разгрузки автономной СБ за счет снятия пиковых токов большой амплитуды, так и с точки зрения повышения срока службы основных элементов системы ЭСП и ДВС за счет обеспечения плавного и безударного запуска двигателя в работу.

Библиографический список

1. **Бирзниекс Л. В.** Импульсные преобразователи постоянного тока. М., «Энергия», 1974. 256 с. с ил.
2. **Нелинейные системы управления с частотно- и широтно-импульсной модуляцией.** Кунцевич В.М., Чеховой Ю.Н. «Техніка», 1970, 340 стр.
3. **Пуск и реверс судовых дизелей.** Кузьмин Р. В., Карпович В. А. Изд-во «Транспорт», 1972, 144 с.
4. **CONTROL SYSTEM DESIGN.** G.C. Goodwin, S.F. Graebe,M.E. Salgado, 1-st edition, Prentice Hall, 2001, 911 p.
5. **FEEDBACK CONTROL SYSTEMS.** C. L. Phillips, R.D.Harbor, 4-th edition, Prentice Hall, 2000, 616 p.

Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

УДК 621.314

А.Б.ДАРЬЕНКОВ, И.А.ВАРЫГИН

РАЗРАБОТКА ВХОДНОГО ФИЛЬТРА МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен расчет входного фильтра матричного преобразователя частоты. Приведены результаты моделирования фильтра в пакете Matlab Simulink. Рассчитан коэффициент нелинейных искажений входного тока МПЧ.

***Ключевые слова*:** матричный преобразователь частоты, фильтр, коэффициент нелинейных искажений.

В течение последних десятилетий во многих областях техники наблюдается неуклонный рост использования силовых полупроводниковых преобразователей, в том числе неуправляемых диодных выпрямителей и преобразователей с естественной коммутацией. Использование подобных устройств как в промышленных, так и в бытовых системах электропитания, является причиной генерации в питающую сеть высших гармонических составляющих малого порядка, имеющих значительное негативное влияние на питающую сеть. Использование массивных входных фильтров позволяет решить эту проблему, но более эффективным является использование высокочастотных импульсных преобразователей, одним из которых является преобразователь частоты (ПЧ) с матричной структурой силовой части (МПЧ). Использование преобразователей с высокими частотами коммутации силовых ключей может значительно сократить генерацию в сеть высших гармоник малого порядка, следовательно, входной фильтр МПЧ имеет лучшие массогабаритные показатели в сравнении с фильтрами ПЧ традиционных топологий.

Как правило, предполагается, что ПЧ питается от идеального источника напряжения, и питает идеальный источник тока. Допуская, что нагрузка имеет преимущественно индуктивный характер, для того, чтобы преобразователь был близок по характеристикам к идеальному источнику напряжения, необходимо подключить емкостные элементы как можно ближе к входу ПЧ. Введение в

цепь емкости, при наличии индуктивности в питающей сети, приведет к появлению у цепи свойств апериодического звена второго порядка. Чтобы сформировать требуемую частоту среза фильтра последовательно в фазу вводится дополнительная индуктивность. Для демпфирования колебаний, возникающих в результате жесткой коммутации ключей преобразователя, в фильтр необходимо включить резистор. Этот резистор может быть подключен последовательно или параллельно с индуктивностью фильтра, либо параллельно с конденсатором. Как показывает опыт исследований [1], активное сопротивление оптимально устанавливать параллельно индуктивности.

Эквивалентная схема фильтра приведена на рисунке 1, где u_{BX} - напряжение сети, $i_{МПЧ}$ - импульсный ток, потребляемый МПЧ.

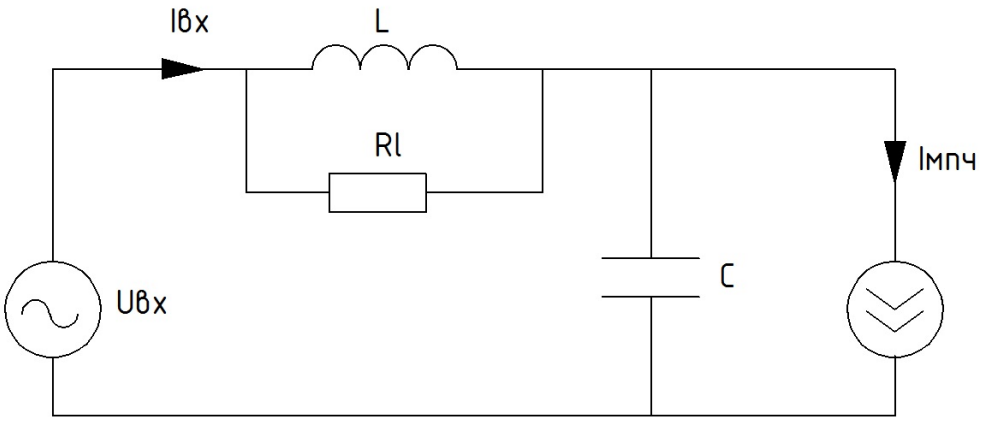


Рис. 1. Эквивалентная схема фильтра МПЧ

Входной ток i_{BX} и напряжение на конденсаторе фильтра $C_Ф$ будут зависеть от напряжения сети u_{BX} и потребляемого преобразователем тока $i_{МПЧ}$. Предположим, что напряжение на входе МПЧ имеет форму идеальной синусоиды с частотой 50 Гц. При этом вычислить реакцию фильтра на входное воздействие не составит значительного труда. Однако, эти же соображения не справедливы, когда речь идет о потребляемом преобразователем импульсном токе $i_{МПЧ}$, зависящем от нагрузки. Определим отклик фильтра на входное воздействие тока $i_{МПЧ}$.

Используя рис. 1, выразим передаточную функцию $i_{BX}(p)$:

$$i_{BX}(p)=\frac{p^2\cdot\frac{1}{r_l}+p\frac{1}{L}}{p^2+p\frac{1}{LC}\left(\frac{L}{r_l}\right)+\frac{1}{LC}}u_{BX}(p)+\frac{p\frac{1}{r_lC}+\frac{1}{LC}}{p^2+p\frac{1}{LC}\left(\frac{L}{r_l}\right)+\frac{1}{LC}}i_{МПЧ}(p). \quad (1)$$

Также можно получить передаточную функцию напряжения на конденсаторе фильтра $C_Ф$ (p):

$$u_Ф(p)=\frac{p\frac{1}{r_l C}+\frac{1}{LC}}{p^2+p\frac{1}{LC}\left(\frac{L}{r_l}\right)+\frac{1}{LC}}u_{BX}(p)-\frac{p\frac{1}{C}}{p^2+p\frac{1}{LC}\left(\frac{L}{r_l}\right)+\frac{1}{LC}}i_{МПЧ}(p). \qquad (2)$$

Знаменатели выражений (1) и (2) представляют собой знаменатели передаточной функции апериодического звена второго порядка, в общем случае имеющий вид

$$d(p)=p^2+2\xi\omega_n p+\omega_n{}^2, \qquad (3)$$

где ωn – частота собственных колебаний (частота среза), ξ – относительный коэффициент затухания.

Найдем частоту собственных колебаний и относительный коэффициент затухания, используя формулы (1-4):

$$\omega_n=\sqrt{\frac{1}{LC}}, \qquad (4)$$

$$\xi=\frac{1}{2r_l}\sqrt{\frac{L}{C}}, \qquad (5)$$

Для обеспечения оптимальной резонансной частоты *RLC* - контура и уменьшения генерации высокочастотных гармоник, желательно, чтобы частота среза фильтра находилась в диапазоне частот, по меньшей мере на порядок выше частоты сети ωi и на порядок ниже частоты коммутации ω_s.

$$\omega_i << \omega << \omega_s. \qquad (6)$$

В созданном авторами прототипе МПЧ [2] частота коммутации силовых вентилей равна 10 кГц, следовательно, частота среза фильтра должна находиться в диапазоне от 500 Гц до 2 кГц:

$$2\cdot 500\pi << \omega_c << 2\cdot 10^3\pi. \qquad (7)$$

Неверно рассчитанный дроссель может привести к значительному сдвигу фаз между током и напряжением, либо привести к большому падению напряжения между входными напряжениями и напряжениями конденсаторов фильтра.

С учетом (2), напряжение на конденсаторе определяется по формуле:

$$u_Ф(p)=u_{BX}(p)-\frac{pL}{pL/r_l+1}i_{BX}(p). \qquad (8)$$

Так как сопротивление r_l имеет довольно высокое значение, то для того, чтобы свести к минимуму падение напряжения на катушке индуктивности при

частоте сети f = 50 Гц индуктивное сопротивление должно быть значительно ниже, чем активное сопротивление.

$$\frac{u_{\Phi}(p)}{u_{BX}(p)} = 1 - \frac{pLr_l}{pL + r_l}\frac{i_{BX}(p)}{u_{BX}(p)} \approx 1 - pL\frac{i_{BX}(p)}{u_{BX}(p)}. \quad (9)$$

Учитывая, что максимальное падение напряжения на зажимах катушки индуктивности не превышает 10% от входного напряжения, индуктивность фильтра может быть рассчитана в соответствии с (10). Предполагается, что входное напряжение и ток равны $u_{BX}(j\omega) = U_{BX}e^{j0}$ и $i_{BX}(j\omega) = I_{BX}e^{j\phi_i}$ соответственно:

$$\left| pL\frac{i_{BX}(p)}{u_{BX}(p)} \right| < 0{,}1 \Rightarrow \frac{\omega L I_{BX}}{U_{BX}} < 0{,}1 \Leftrightarrow L < \frac{0{,}1U_{BX}}{\omega I_{BX}}. \quad (10)$$

Сдвиг фаз тока и напряжения, появившийся после введения индуктивности определяется формулой (11). При фиксированном падении напряжения на зажимах катушки индуктивности (ωLI_l), выраженном как часть входного напряжения, можно рассчитать сдвиг фаз между напряжениями на входе фильтра (напряжением сети) и на выходе фильтра (напряжением на конденсаторе):

$$\phi_c = arctg\left(\frac{\cos\phi_{BX}\omega L I_{BX} / U_{BX}}{1 + \sin\phi_{BX}\omega L I_{BX} / U_{BX}} \right). \quad (11)$$

Если максимальное значение падения напряжения на индуктивности составляет 10% от входного напряжения, коэффициент смещения между напряжением сети и напряжением на конденсаторе не должен превышать 6 °.

Если падение напряжения на индуктивности составляет 10% от напряжения питающей сети, то напряжение на конденсаторе практически равно напряжению сети. Необходимо обеспечить минимальный сдвиг фаз между первой гармоникой тока МПЧ $i1_{МПЧ}(p)$, и током сети $i_{BX}(p)$. Это можно обеспечить путем верного выбора номинала конденсатора фильтра. Максимальное значение емкости определяется на основе максимально допустимого коэффициента смещения между $i1_{МПЧ}$ и $i_{BX}(p)$.

$$C_{\max} = \frac{I_{1МПЧ}}{\omega U_{\Phi}} tg\phi_{\max}. \quad (12)$$

Для подтверждения теоретических данных, была создана модель фильтра в программном пакете MATLAB Simulink. Расчетные параметры фильтра для прототипа МПЧ, созданного на базе лаборатории НГТУ, составляют C=2,8·10^{-7} Ф, L = 200 ·10^{-6} Гн, R = 7 Ом. Диаграммы входного и выходного токов фильтра, а также результаты гармонического анализа представлены на рис. 2,3.

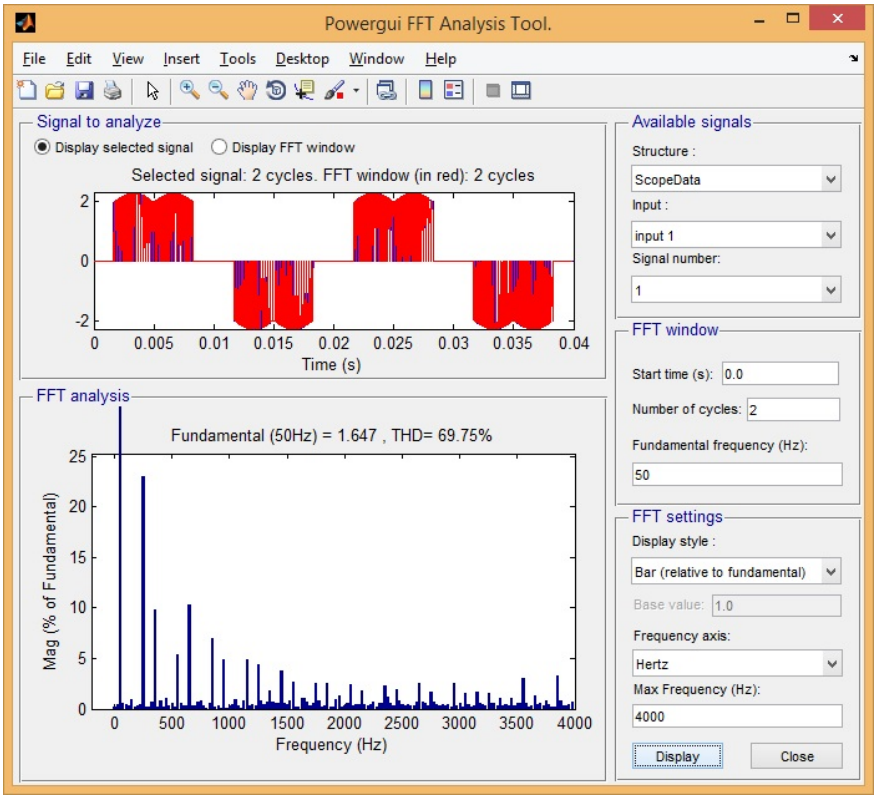


Рис. 2. Диаграммы входного тока фильтра и его гармонический анализ

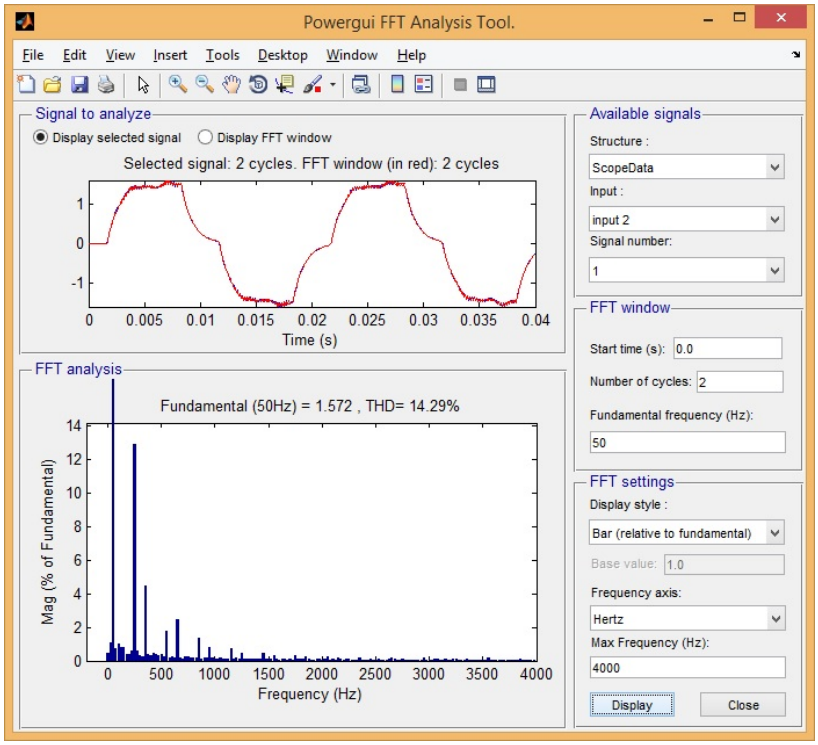


Рис. 3. Диаграммы выходного тока фильтра и его гармонический анализ

Как видно из результатов моделирования, коэффициент нелинейных искажений (THD) входного тока МПЧ после введения фильтра уменьшился с 69,8% до 14,3%.

Библиографический список

1. **Kenji Yamada.** Optimization of input and output filters in matrix converter drive system. Electronics and Communications in Japan // Volume 91, Issue 8, pages 1–10.
2. **Дарьенков А.Б.** Макет матричного преобразователя частоты / Дарьенков А.Б., Хватов О.С., Корнев.Д.А., Варыгин И.А. // Материалы XI молодежной научно-технической конференции / НГТУ Н.Новгород, 2012. – с.58.

УДК 621.314

Н.Н.ВИХОРЕВ, И.С.ПАНФИЛОВ, А.И.ЧИВЕНКОВ, С.Ю.ПАНФИЛОВ

УСТРОЙСТВО ПОЭЛЕМЕНТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород

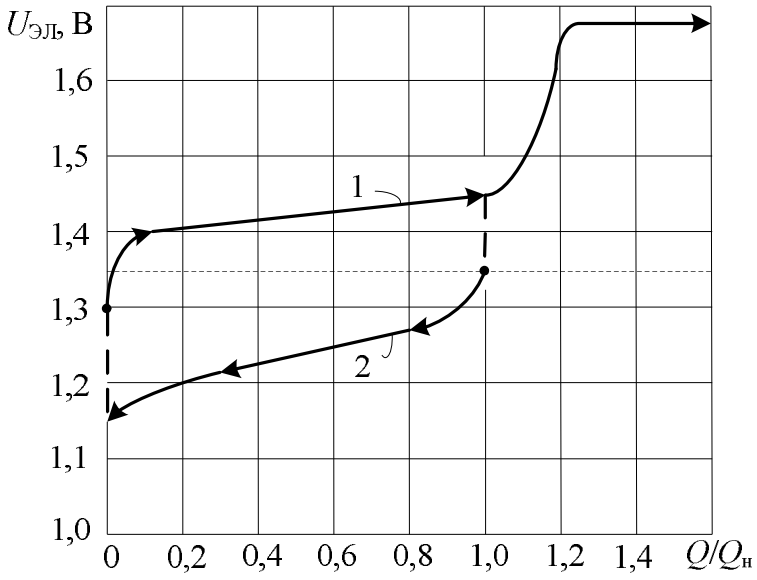
Предложено устройство измерения напряжения последовательно соединенных элементов аккумуляторных батарей для оценки степени их заряженности.

***Ключевые слова*:** герконовые реле, гальваническая развязка, аналогово-цифровой преобразователь.

В системах автономного электропитания для обеспечения бесперебойности и повышения КПД (максимального возможного исключения работы активных разрядных устройств) применяются гибридные буферные накопители, включающие в себя аккумуляторные элементы и конденсаторы высокой емкости [1]. Для реализации алгоритма управления такой системой необходима достоверная информация о степени заряженности аккумуляторных элементов. Как правило, текущая оценка степени заряженности производится по нескольким параметрам одновременно: значениям напряжения в зависимости от режима работы (разряд или заряд) элемента и его температуры.

Перспективным направлением в настоящее время считается использование в качестве буферных накопителей *NiCd* аккумуляторных элементов, вольт-зарядные (разрядные) характеристики (зависимость напряжения аккумуляторного элемента $U_{ЭЛ}$ от относительной величины количества электричества $Q/Q_н$) которых приведены на рис. 1.Отличительной особенностью *NiCd* аккумуляторных элементов является наличие линейных участков зарядных (разрядных)

характеристик [2, 3] в диапазоне $Q/Q_н$=0,5 ± 0,3 буферных накопительных элементов.



1 – зарядная характеристика при I=0,1 С/ч;

2 – разрядная характеристика при I=0,1 С/ч.

Рис. 1. Вольт-зарядная характеристика *NiCd* аккумуляторных элементов

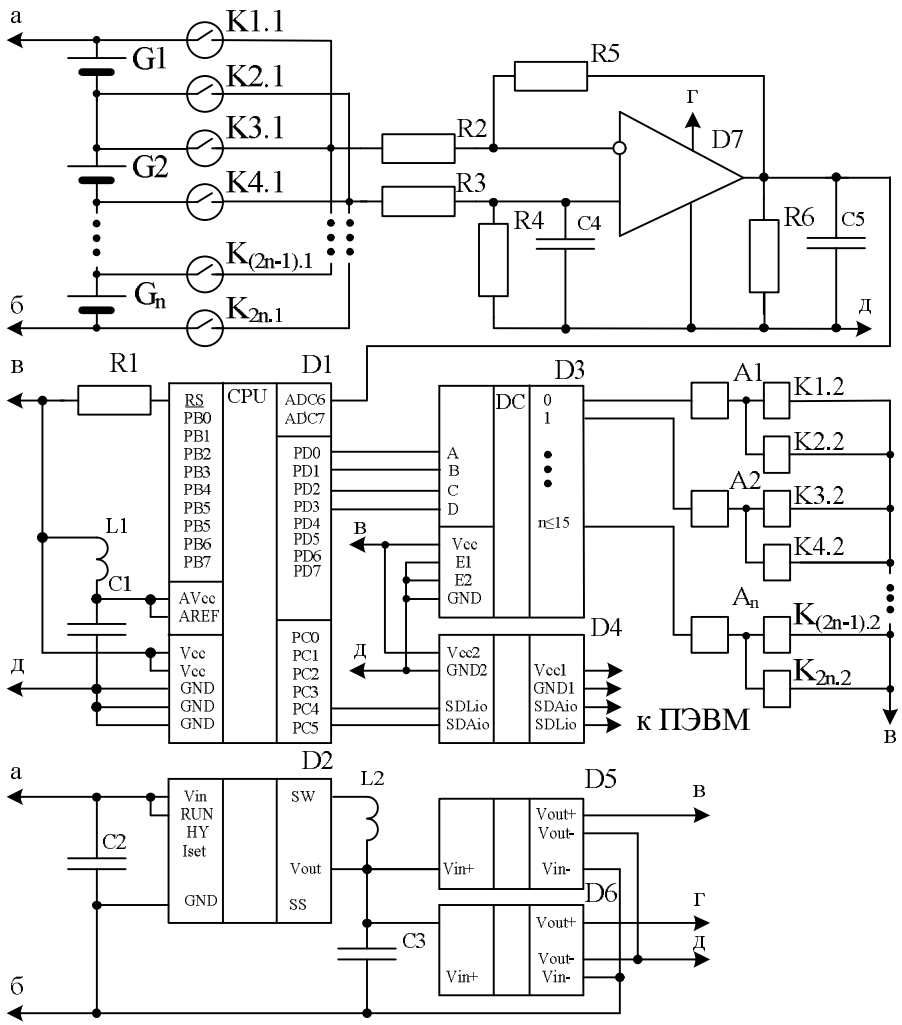
На рис. 2 приведен один из вариантов реализаций измерителя напряжения, обеспечивающего последовательное во времени определения параметров на каждом элементе аккумуляторной батареи. Основой измерителя напряжения является аналогово-цифровой преобразователь $D1$, разрядность которого определяет погрешность измерений.

Последовательность измерений обеспечивает коммутатор, выполненный на герконовых реле К1…$К_{2n}$ (количество реле равно удвоенному числу элементов аккумуляторной батареи) типа РЭС64А с параметрами:

- ресурс 10^6-10^8 переключений;
- переходное сопротивление контактов 0,05 Ом;
- диапазон токов контактной группы $5\cdot10^{-6}$ - 10^{-3} А.

Такой коммутатор по сравнению с твердотельными (полупроводниковыми) коммутаторами в измерительных системах имеет преимущество по малому переходному сопротивлению и большому сопротивлению разомкнутых контактов, что является определяющим фактором для снижения погрешности измерений. Управление коммутатором осуществляется дешифратором ($D3$) четырехразрядного параллельного двоичного кода в параллельный шестнадцатеричный код. Реле включаются попарно К1 и К2, К3 и К4 … $К_{(2n-1)}$ и $К_{2n}$, что обеспечивает неизменность конфигурации цепей измерения. Время включения каждой пары реле соответствует необходимому времени измерений и передачи информационного сообщения на ПЭВМ.

Между включениями пар реле предусмотрена пауза («охранная зона») для обеспечения разрывности измерений каждого элемента аккумуляторной батареи.



D1 - Atmega48PA TQFP32; D2 - LTC3631-5; D3 - 74HC154; D4 - CPC5902;

D5 - RB-0524S; D6 - RB-0505S; D7 - LM357n.

Рис. 2. Схема устройства поэлементного измерения напряжения аккумуляторной батареи

Для согласования сопротивлений выходных каскадов дешифратора с сопротивлениями обмоток реле предусмотрены устройства сопряжения A1…A_n

Сопряжение напряжения элементов аккумуляторной батареи с уровнем аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) осуществляется операционным усилителем *D*7. Это звено может быть включено как повторитель напряжения (коэффициент передачи равен 1) или как усилитель, для расширения возможностей оцифровывания сигнала.

Требуемая погрешность измерений обеспечивается кроме конфигурации коммутатора также разрядностью АЦП. В предлагаемом измерителе разрядность АЦП выбрана 2^{10} - погрешность измерений 1 мВ.

Для связи с ПЭВМ, работающей в отличном от аккумуляторной батареи потенциальном поле, используется устройство гальванической развязки *D*4 оптоэлектронного типа. Электропитание входных цепей этого устройства осуществляется от источника электропитания измерителя напряжения, а электропитание выходных цепей - от ПЭВМ.

Электропитание всей измерительной системы производится от аккумуляторной батареи. Требуемые уровни напряжений и их гальваническая развязка от аккумуляторной батареи обеспечивается интегральным преобразователем *D*2 и стабилизаторами напряжения *D*5 и *D*6.

Рассмотренная структура измерителя напряжений элементов аккумуляторной батареи позволяет осуществить контроль напряжений нескольких батарей, в том числе соединенных последовательно, что является актуальным для энергетических систем 0,4 кВ, в которых число элементов может достигать 500 штук, а потенциальное поле между ними 800 В.

Библиографический список

1. **Вихорев, Н.Н.** Система автономного электропитания с топливным элементом и буферным накопителем / Н.Н. Вихорев, И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, С.Ю.Панфилов // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ, Н.Новгород. 2014.

2. **Коровин, Н.В.** Химические источники тока. Справочник / Н.В. Коровин, А.М. Скудин. – Москва: Издательство МЭИ, 2003. – 740 с.

3. **Романов, В.В.** Химические источники тока / В.В. Романов, Ю.М. Хашев. – Москва: Издательство “Советское радио”, 1968. – 384 с.

УДК 621.314

Н.Н.ВИХОРЕВ, И.С.ПАНФИЛОВ, А.И.ЧИВЕНКОВ, С.Ю.ПАНФИЛОВ

СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И БУФЕРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород

Предложено устройство для повышения эффективности использования топливного элемента в системе автономного электроснабжения.

***Ключевые слова*:** топливный элемент, гибридный емкостный накопитель, аккумуляторный никель-кадмиевый элемент.

Перспективным направлением в системах электропитания автономных объектов является применение топливных элементов, обладающих рядом преимуществ перед другими (дизель-генераторными, солнечными и т.п.) источни-

ками электроэнергии: высокий КПД (60-80%), меньшие размеры при тех же энергетических показателях, экологичность (выделяется только водяной пар).

Однако, для устойчивой работы топливного элемента требуется высокая температура, а регулирование производится как за счет изменения температуры, так и за счет изменения скорости подачи химических реагентов. Это в свою очередь обуславливает высокую инерционность топливных элементов, то есть невозможность их быстрого реагирования на меняющуюся нагрузку без ухудшения качества генерируемой электроэнергии.

Для сохранения качества генерируемой топливными элементами электроэнергии при изменении нагрузки (изменении её сопротивления) используют балластный резистор, то есть дополнительную регулируемую нагрузку, включенную параллельно с потребителем электроэнергии (рис. 1). Алгоритм работы регулируемого балластного резистора заключается в поддержании относительно постоянного значения сопротивления нагрузки на выходе топливного элемента. При этом мощность балластного резистора должна соответствовать девиации мощности потребителя. Наличие баластного резистора в свою очередь снижает не только результирующий КПД, но и все декларируемые преимущества топливных элементов (ТЭ).

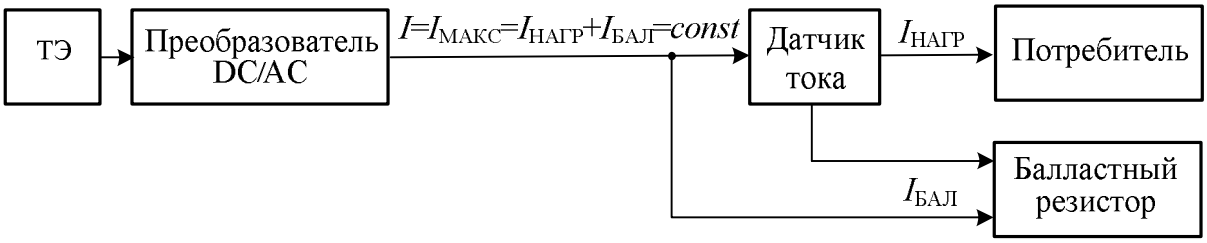


Рис. 1. Структурная схема автономной энергосистемы с топливным элементом

Эффективным способом повышения КПД рассматриваемой системы является применение буферных накопителей энергии, а наличие в системе цепей постоянного тока позволяет в качестве буферных накопителей электроэнергии использовать совместно (гибридные накопители) или раздельно аккумуляторные элементы и конденсаторы высокой емкости. Введение в систему буферных накопителей энергии оправдано также возможностью обеспечить беспрерывность электропитания потребителей.

Алгоритм работы буферных накопителей заключается в следующем:

- при стабильной работе электросистемы (генерируемая мощность соответствует мощности потребления) аккумуляторная батарея в перераспределении электроэнергии не участвует;
- при сбросе нагрузки (генерируемая мощность больше мощности потребления) аккумуляторная батарея должна быть способна использовать разницу энергий для своего заряда;
- при резком возрастании нагрузки или «разгоне» генератора (генерируе-

мая мощность меньше мощности потребления) аккумуляторная батарея должна восполнить дефицит электроэнергии;

- после реагирования на сброс/наброс нагрузки аккумуляторная батарея должна быть выведена в исходное состояние, соответствующее среднему заряду.

В гибридных буферных накопителях конденсаторы могут выполнять лишь вспомогательные функции, поскольку их удельные массогабаритные показатели (отношение емкости к массе и объему) значительно ниже, чем у аккумуляторных элементов.

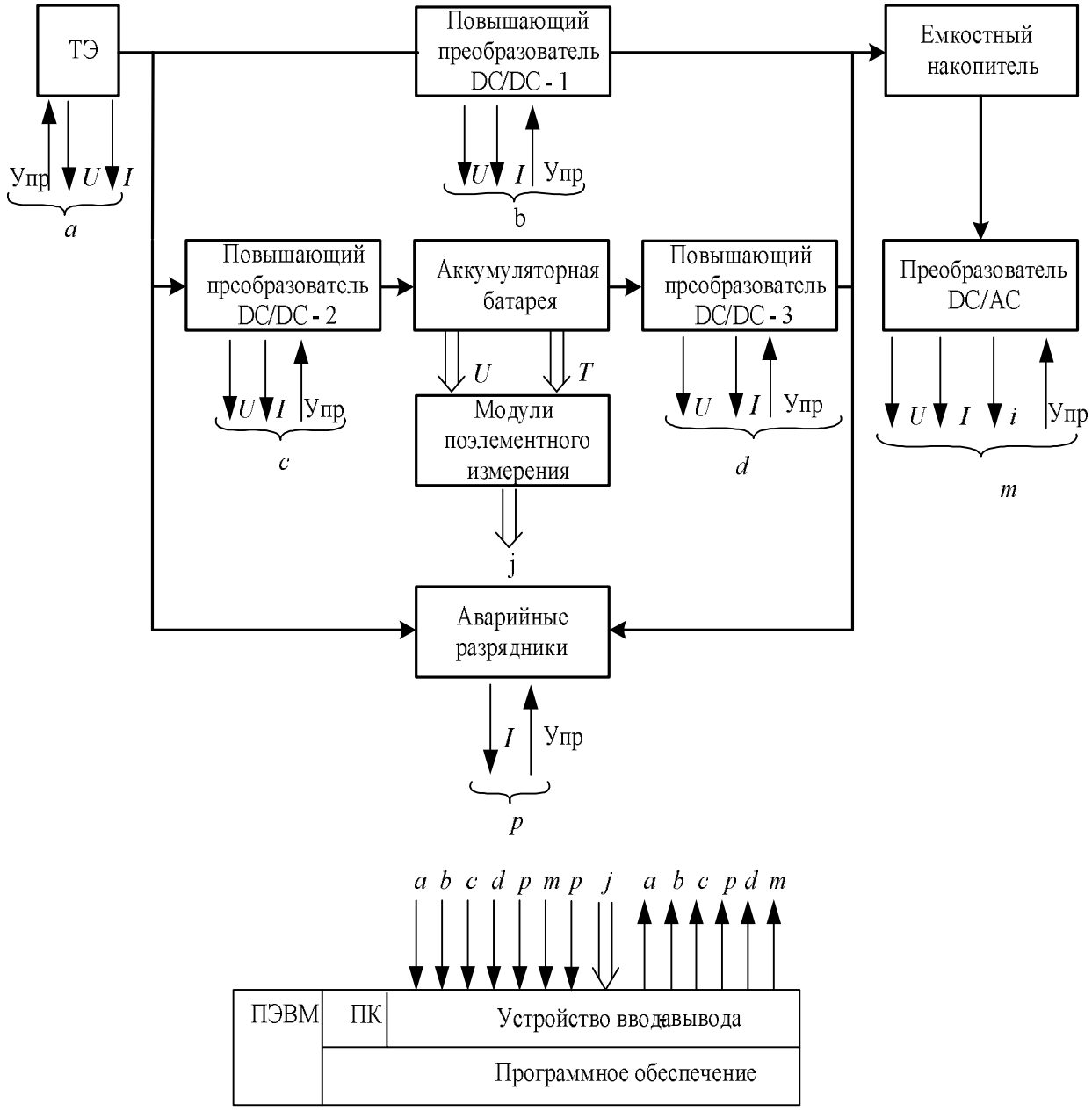


Рис. 2. Система автономного электропитания с буферным накопителем

Система автономного электропитания с буферным накопителем (рис. 2) также содержит балластные резисторы (на рис.2 аварийные разрядники), но они выполняют только вспомогательную функцию.

Аварийные разрядники используются при регламентных работах и аварийных ситуациях, то есть на КПД системы влияния не оказывают.

В качестве буферного накопителя используются никель-кадмиевые аккумуляторы. Этот тип аккумуляторных элементов допускает глубокий разряд аккумуляторных батарей, длительное время хранение в полностью разряженном состоянии с сохранением номинальной емкости, большое число перезарядов.

Алгоритм управления и взаимодействия составных частей системы реализует персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ) на основе собранных данных о текущей нагрузке, генерируемой мощности и заряде аккумуляторной батареи.

Применение ПЭВМ на этапе разработки обусловлено сложностью решения задачи по определению степени заряженности аккумуляторных элементов. Зависимость заряженности аккумуляторных элементов от напряжения нелинейная, имеет гистерезисный характер (восходящая и нисходящая ветви). Кроме того, эти вольтзарядные (разрядные) характеристики зависят от температуры аккумуляторных элементов. Информация о напряжениях каждого аккумуляторного элемента [2] и его температуре поступает ПЭВМ от модулей поэлементного измерения.

Использование ПЭВМ также позволяет проводить оператором объективный контроль работы системы и при необходимости оперативно корректировать режимы её работы.

Преобразователи DC/DC-1, DC/DC-2, DC/DC-3 осуществляют регулирование потоков электроэнергии по различным направлениям и согласование уровней входных и выходных напряжений топливных элементов, аккумуляторной батареи и преобразователя DC/AC, формирующего переменное напряжение заданных уровня и частоты. Использование преобразователей DC/DC-1, DC/DC-2, DC/DC-3 расширяют возможности для формирования систем автономного электропитания из взаимно несовместимых по уровням напряжений элементов.

Библиографический список

1. **Соснина, Е.Н.** Вопросы сопряжения параметров источников малой распределительной энергетики / Е.Н. Соснина, А.И, Чивенков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова / БГТУ, Белгород. 2012. №2. С. 158-164.

2. **Вихорев, Н.Н.** Устройство поэлементного измерения напряжения аккумуляторной батареи / Н.Н. Вихорев, И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, С.Ю.Панфилов // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ, Н.Новгород. 2014.

УДК 621.314

Н.Н.ВИХОРЕВ, И.С.ПАНФИЛОВ, А.И.ЧИВЕНКОВ, С.Ю.ПАНФИЛОВ

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ТРАНЗИСТОРОМ НА ОСНОВЕ ОДНОТАКТНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород

Предложено устройство для повышения эффективности использования биполярных транзисторов в преобразователях напряжения.

Ключевые слова: дроссель, гальваническая развязка, «обратный» преобразователь.

Преобразование энергии на частотах свыше 100 кГц требует особого подхода к управлению силовыми транзисторами. Для уменьшения потерь и расширения диапазона регулирования схема управления должна реализовать форсированное переключение силового транзистора с малыми временами рассасывания при обеспечении гальванической развязки от силовой его части.

При управлении биполярными транзисторами для снижения времени выключения формируют импульс обратного тока, что в значительной степени снижает время рассасывания зарядов, накопленных в база-эмиттерном переходе [1,2].

Такой режим может обеспечиваться попеременным подключением базы силового транзистора к источникам с разной полярностью напряжения. Но наибольший интерес представляют схемы управления, требующие для своего функционирования один источник напряжения, который используется также для питания схемы управления. Подобное построение обеспечивает упрощение вспомогательных цепей и, как следствие, повышение надежности, удельных массогабаритных показателей и других технико-экономических показателей источника вторичного электропитания (ИВЭП). Одним из способов решения формирования двухполярных импульсов напряжения от однополярного источника напряжения является сочетание «прямого» и «обратного» преобразователей.

На рис. 1а представлен один из вариантов предложенной схемы управления. «Обратный» преобразователь, образованный дросселем $L1$ и диодом $VD1$, является зависимым от «прямого» преобразователя, образованного транзистором $VT1$ и трансформатором $TV1$. При включении транзистора $VT1$ по управляющему сигналу u_1 напряжение вспомогательного источника E прикладывается к дросселю $L1$ и первичной обмотке $W1$ трансформатора $TV1$, на вторичной обмотке $W2$ которого формируется напряжение, открывающее транзистор $VT2$.

В интервал времени включенного транзистора *VT*1 происходит накопление энергий в сердечниках трансформатора *TV*1 и дросселя *L*1, пропорциональных величине напряжения вспомогательного источника напряжения и времени включенного состояния транзистора *VT*1. В интервал времени выключенного состояния транзистора *VT*1 за счет энергий, накопленных в реактивных элементах схемы, формируется импульс тока в направлении, противоположном включающему силовой транзистор *VT*2.

Рассмотренную схему наиболее предпочтительно использовать в ИВЭП с относительно небольшими изменениями коэффициента заполнения управляющих импульсов, то есть при узких диапазонах изменения тока нагрузки и питающих напряжений.

Если питающее напряжение ИВЭП или ток нагрузки изменяются в широких пределах, необходимо фиксировать интервал времени накопления энергии в «обратном» преобразователе. Это достигается в схеме, представленной на рис. 1б, в. В ней «обратный» преобразователь снабжается дополнительным транзистором *VT*1, который подключает в соответствии с сигналом u_1 дроссель *L*1 к источнику входного напряжения *E* на фиксированный промежуток времени t_1-t_2, независимо от времени включенного транзистора *VT*2. Процессы в схеме управления силовым транзистором протекают аналогично процессам рассмотренной выше схемы.

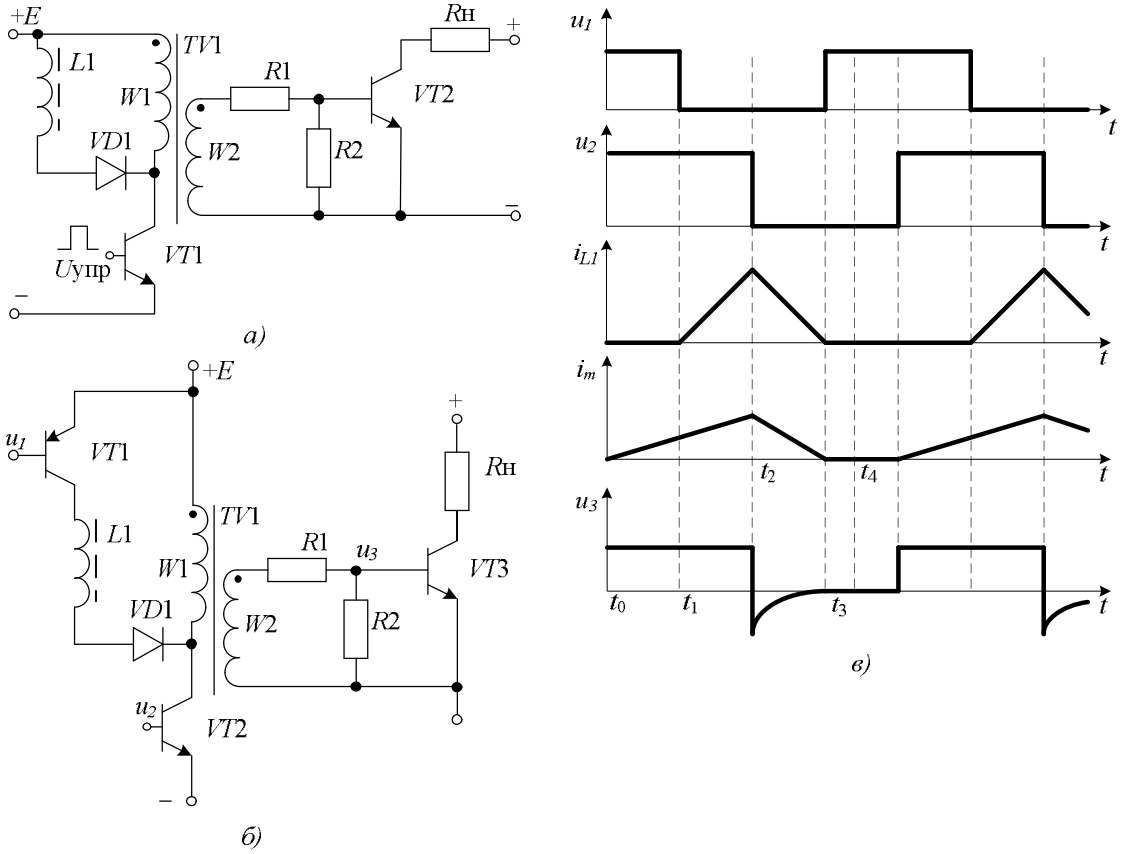


Рис. 1. Схемы управления биполярным транзистором:
а) с одним сигналом управления, б) с двумя сигналами управления, в) диаграмма работы схемы с двумя сигналами управления.

Особенностью предложенной схемы управления силовыми транзисторами (рис. 1б,в) является необходимость формирования двух управляющих сигналов u_1 и u_2 с фиксированным временем перекрытия t_1-t_2.

Ни одна из существующих стандартных специализированных интегральных микросхем для импульсных ИВЭП не обеспечивает формирование сигналов с такой последовательностью. Существует возможность реализации устройств с заданными функциями с помощью дополнительных устройств. Необходимым условием является лишь наличие в интегральной схеме генератора пилообразного напряжения с пологим фронтом и крутым срезом, например, как в ИС 1114ЕУ1 и 1114ЕУЗ.

Разработано несколько вариантов построения электронной части схемы управления силовым транзистором, отличающихся между собой типом используемой элементной базы. На рис. 2 представлен вариант цепи обратной связи импульсного ИВЭП, выполненный с использованием дополнительного компаратора (*DA*1) и одновибратора (*DD*1).

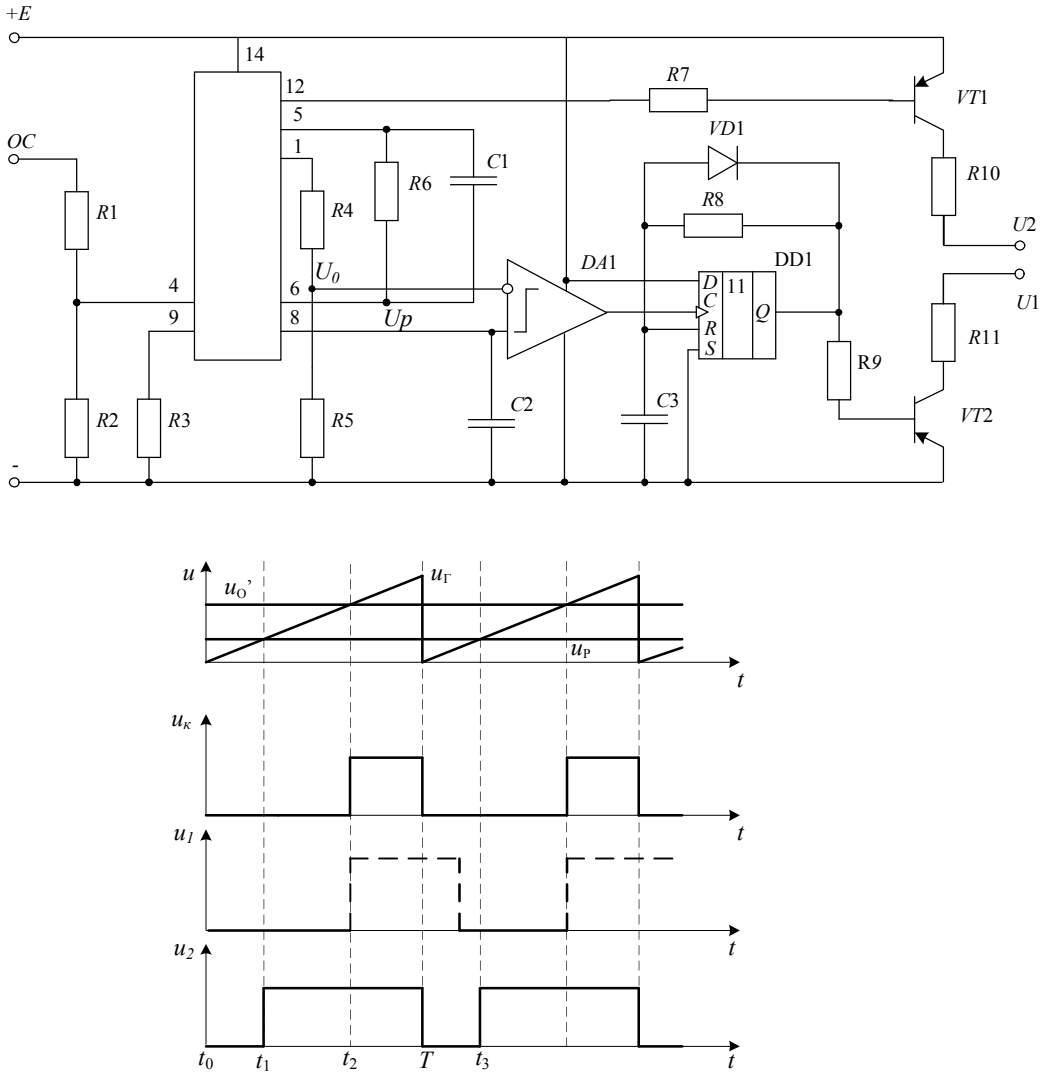


Рис. 2. Схема формирования сигналов для управления биполярными транзисторами.

Схема обеспечивает формирование широтно-модулированного сигнала u_2, длительность которого определяется напряжением $u_Г$, сформированным генератором пилообразного напряжения, и напряжением сформированным усилителем рассогласования выходного напряжения ИВЭП и опорного (микросхема *D*1 - 1114ЕУ3). Так как срезы сигналов $u_Г$ и u_2 всегда совпадают, появляется возможность сформировать на выходе компаратора *DA*1 импульсное напряжение $u_К$, фронт которого опережает срез сигнала u_2 в любой период на одну и ту же величину t_2-*T*. Это обеспечивается сравнением двух сигналов: $u_О'$, являющегося частью опорного (вывод 1 микросхемы *D*1), и пилообразного $u_Г$ (вывод 8 микросхемы *D*1). Для поддержания во включенном состоянии транзистора *VT*2 в интервал времени выключенного транзистора *VT*1 необходимо увеличить длительность сформированного компаратором сигнала, что достигается введением в схему одновибратора с времязадающей цепью *R*8-*C*3. Интервал времени опережения фронта сигнала u_1 по отношению к срезу сигнала u_2 возможно регулировать подбором резистивного делителя *R*4-*R*5.

Использование описанной схемы управления для ИВЭП с силовым транзистором типа 2Т862Г позволило обеспечить следующие параметры сигналов управления: время нарастания 80 нс, время задержки выключения 200 нс, время спада 100 нс, что обеспечивает эффективное управление биполярными транзисторами на частотах 100-200 кГц.

Библиографический список

1. **Панфилов, С.Ю.** Реализация схем управления силовыми транзисторами импульсных преобразователей постоянного напряжения / С.Ю. Панфилов, И.В, Полетаев // Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. 5 Всесоюз. науч. – технич. конф., Черновцы, сент. 1991г. – ч.2. С.23-25.

2.**Панфилов, С.Ю.** Построение унифицированных источников вторичного электропитания/С.Ю. Панфилов, И.В, Полетаев//Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. 5 Всесоюз. науч. – технич. конф., Черновцы, сент. 1991г. – ч.2. С.45-47.

УДК 621

В.В. БОГАТЫРЕВ

ИНДУКЦИОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА С ПОДВИЖНОЙ ОБМОТКОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается устройство, позволяющее выполнять регулирование тока с коэффициентом мощности равным единице во всем диапазоне регулирования.

***Ключевые слова*:** Регулятор тока, неподвижные обмотки, подвижная к.з. обмотка, резонанс напряжений, резонанс токов.

В промышленности часто возникает необходимость в простых и надежных вторичных источниках регулируемого тока. Одним из перспективных направлений в создании таких источников является разработка индукционных регуляторов переменного тока (ИТР) с подвижными обмотками.

Они успешно использовались для проверки релейной защиты, для проверки многоамперных воздушных автоматов, поскольку позволяют получить токи в сотни, а при использовании промежуточных трансформаторов тысячи ампер [1].

При регулировании токов они позволяют получить достаточно широкий диапазон регулирования при минимальном искажении формы тока.

ИТР в классическом исполнении представляет собой трансформатор с подвижной обмоткой. Магнитная система выполняется в виде удлиненного Ш – образного сердечника, на котором расположены две обмотки, одна из которых – неподвижная, другую, короткозамкнутую, можно принудительно с помощью червячной пары перемещать вдоль сердечника.

Индуктивность рассеяния неподвижной обмотки определяется формулой, полученной методом замены действительного поля рассеяния эквивалентным плоско-параллельным полем [2]

$$L = \mu o \cdot w^2 \cdot \left(\frac{h1 + h2}{3} + \delta\right) \cdot \left[\frac{2b}{bo} + \frac{3{,}48}{\log\left(1 + \frac{4 \cdot к \cdot bo}{a}\right)}\right] \quad (1)$$

w – число витков неподвижной обмотки; h_1, h_2 – высота неподвижной и подвижной обмоток; b_o, a – ширина окна и стержня магнитопровода; b – толщина пакета магнитопровода; δ – расстояние между обмотками; $к$ – опытный корректировочный коэффициент.

Выражение (1) можно представить в упрощенном виде

$$L = Lo + \frac{3 \cdot Lo \cdot \delta}{h1 + h2} \quad (2)$$

L_o – индуктивность рассеяния неподвижной обмотки при $\delta = 0$.

При перемещении подвижной к.з. обмотки вдоль магнитопровода будет меняться индуктивность рассеяния неподвижной обмотки, а, следовательно, ток. Недостатками такого регулятора являются сравнительно узкий диапазон регулирования, который фактически не превышает 1:4 и пониженный коэффициент мощности.

Улучшить эти показатели можно в ИТР с двумя неподвижными обмотками, с использованием резонансных режимов. Конструктивно это можно выполнить, разместив рядом на панели два ИТР так, чтобы неподвижные обмотки располагались на противоположных концах сердечников, а подвижные обмотки были жестко закреплены между собой и принудительно перемещались вдоль сердечников.

Можно выполнить один сердечник, разместить на его концах неподвижные обмотки, а подвижную обмотку перемещать вдоль сердечника [3].

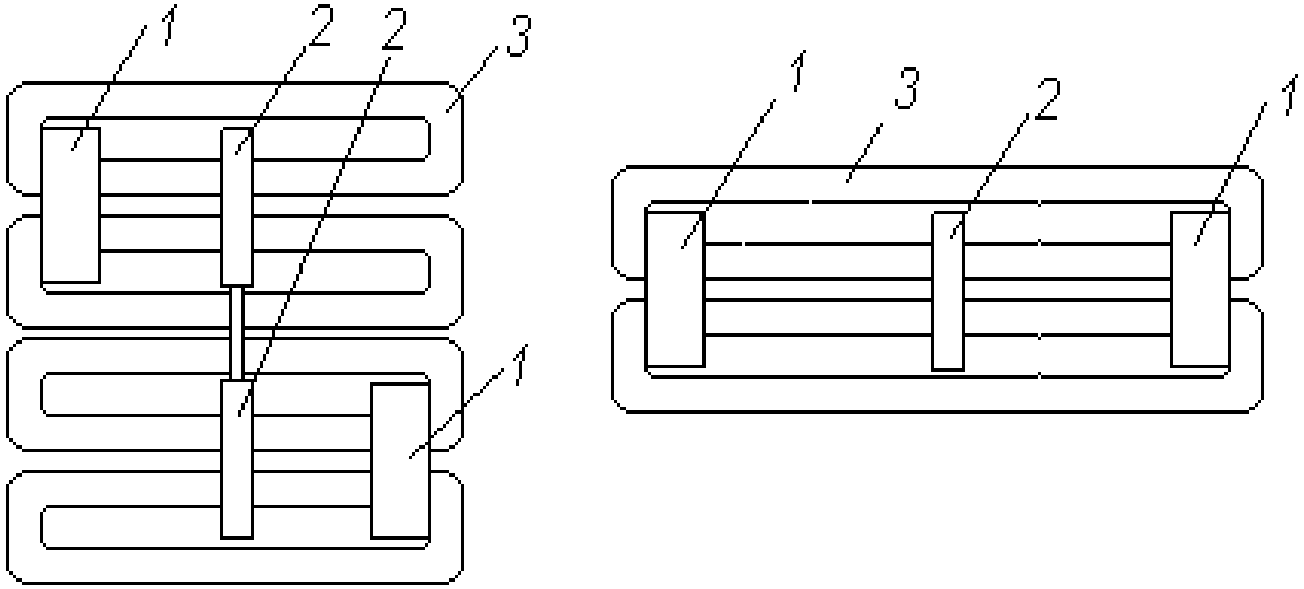


Рис.1. Индукционный регулятор тока с подвижной обмоткой
1- неподвижные обмотки; 2- подвижные к.з. обмотки;3- Ш – образный сердечник.

И в том и в другом варианте последовательно с неподвижными обмотками подключаются емкости. Ниже представлена схема замещения и круговая диаграмма таких ИТР.

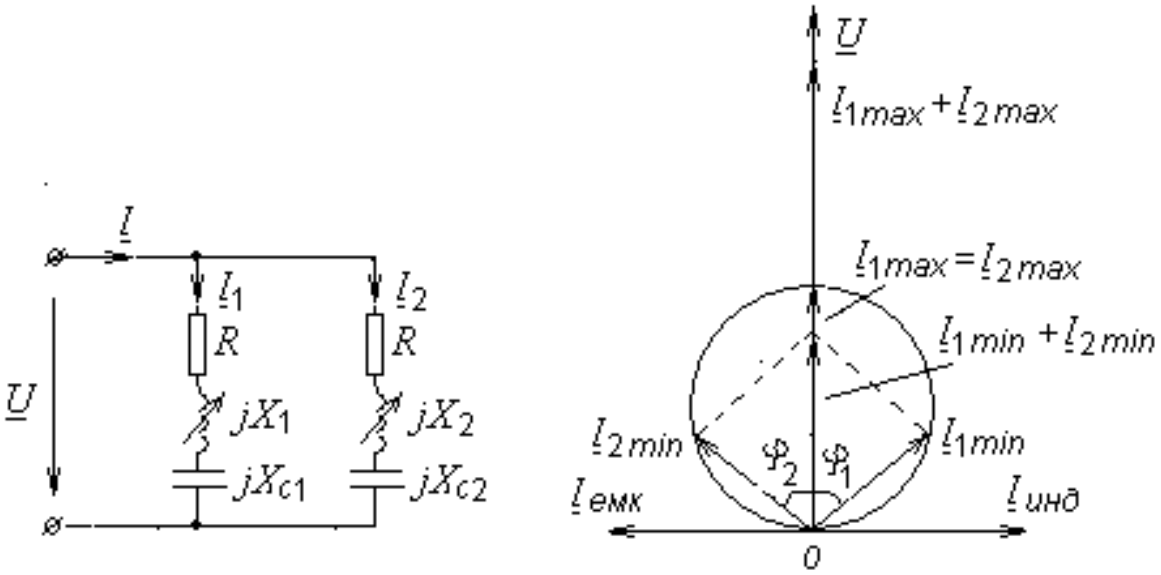


Рис. 2. Схема замещения и круговая диаграмма

Если приблизить подвижную обмотку к первой неподвижной, получим X_1min и X_2max. Чтобы получить режим резонанса в первой обмотке, нужно подключить емкостное сопротивление $X_{c1} = X_1min$. Тогда $I_1max = U/R$.

Чтобы получить режим резонанса во второй обмотке, надо подключить емкостное сопротивление $X_{c2} = X_{2max}$. Тогда $I_{2max} = U/R$. Входной ток будет равен их сумме и совпадать по фазе с входным напряжением.

Рассмотрим вторую крайнюю точку, где токи должны быть минимальные. Здесь X_{1max} и X_{2min}. Чтобы также на входе получить угол $\varphi = 0$, надо, чтобы

$\varphi_1 = \varphi_2$.

В первой ветви:

$$\varphi 1 = arctg\left(\frac{X_{1max} - X_{c1}}{R}\right) = arctg\left(\frac{X_{1max} - X_{1min}}{R}\right) \quad (3)$$

Учитывая, что в обычном ИТР $X_{1max} = 4\,X_{1min}$, получим:

$$\varphi 1 = arctg\left(\frac{3 \cdot Xmin}{R}\right) \quad (4)$$

Во второй ветви:

$$\varphi 2 = arctg\left(\frac{X_{2min} - X_{c2}}{R}\right) = arctg\left(\frac{X_{2min} - X_{2max}}{R}\right) \quad (5)$$

Здесь получим:

$$\varphi 2 = -arctg\left(\frac{3 \cdot Xmin}{R}\right) \quad (6)$$

Входной ток равен векторной сумме этих токов и также будет совпадать по фазе с входным напряжением, а, следовательно, $\cos\varphi = 1$.

Рассмотрим режим работы ИТР при промежуточном положении подвижной обмотки. В этом случае индуктивные сопротивления неподвижных обмоток изменятся на ΔX т.е. $X_1 = X_{1max} - \Delta X$ и $X_2 = X_{2min} + \Delta X$.

Комплексное сопротивление первой неподвижной обмотки

$$\underline{Z}_1 = R + j(X_{1max} - \Delta X - X_{c1}) = R + j(X_{1max} - \Delta X - X_{1min}) = \\ = R + j(3X_{1min} - \Delta X) \quad (7)$$

$$\varphi 1 = arctg\left(\frac{3 \cdot Xmin - \Delta X}{R}\right) \quad (8)$$

Комплексное сопротивление второй неподвижной обмотки

$$\underline{Z}_2 = R + j(X_{2min} + \Delta X - X_{c2}) = R + j(X_{2min} + \Delta X - X_{2max}) = \\ = R + j(-3Xmin + \Delta X) \quad (9)$$

$$\varphi 2 = -arctg\left(\frac{3 \cdot Xmin - \Delta X}{R}\right) \quad (10)$$

Таким образом, и при промежуточном положении подвижной обмотки $\varphi_1 = \varphi_2$ и $\cos\varphi = 1$.

Итак, для получения $\cos\varphi = 1$ надо к неподвижным обмоткам подключить емкости в соотношении

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{X_{max}}{X_{min}} \approx 4 \tag{11}$$

т.е. емкость конденсатора во второй обмотке должна быть примерно в 4 раза больше емкости конденсатора в первой обмотке.

Диапазон регулирования данного ИТР можно представить как отношение его максимального полного сопротивления к минимальному $Zmax/Zmin$.

Для обеих неподвижных обмоток $R_1=R_2=R$ и $X_1max=X_2max=Xmax$, $X_1min=X_2min=Xmin$, $X_{C1}= Xmin$, $X_{C2} = Xmax$, $Xmin = кXmax$.
Поскольку в верхней точке диапазона регулирования в каждой ветви ИТР возникает режим резонанса напряжений $Zmin = R/2$.

В нижней точке регулирования – резонанс токов $B_{L1}= B_{C2}$ и $B_{L2}= B_{C1}$.

Активная проводимость каждой ветви в этой точке

$$G_1 = \frac{R}{R^2 + (X_{max} - X_{c1})^2} = \frac{R}{R^2 + (X_{max} - X_{min})^2} \tag{12}$$

$$G_2 = \frac{R}{R^2 + (X_{max} - X_{c2})^2} = \frac{R}{R^2 + (X_{max} - X_{min})^2} \tag{13}$$

Проводимость ИТР в нижней точке регулирования

$$Y = G_1 + G_2 = \frac{2 \cdot R}{R^2 + (X_{max} - X_{min})^2} \tag{14}$$

Соответственно

$$Z_{max} = \frac{R^2 + (X_{max} - X_{min})^2}{2 \cdot R} \tag{15}$$

$$\frac{Z_{max}}{Z_{min}} = 1 + \left(\frac{X_{max} - X_{min}}{R}\right)^2$$

Диапазон регулирования ИТР можно существенно увеличить, уменьшив активное сопротивление неподвижных обмоток.
При этом надо иметь в виду, что уменьшение активного сопротивления неподвижных обмоток вызовет в верхней точке диапазона регулирования увеличение

добротности контуров, а, следовательно, увеличение напряжений на неподвижных обмотках и на конденсаторах.

Выводы:

Представленный индукционный регулятор тока позволяет:

1. существенно увеличить диапазон регулирования тока;
2. выполнять регулирование с коэффициентом мощности равным единице во всем диапазоне регулирования.

Библиографический список:

1. **Богатырев В.В., Воскресенский А.А., Серебрякова Е.Н., Чистякова Н.П.** Индукционные регуляторы тока с подвижными обмотками-Электротехника. 1981. №2

2. **Серебрякова Е.Н.** Индуктивное сопротивление рассеяния броневого трансформатора с подвижными обмотками.- Известия вузов СССР. Сер. Энергетика. 1977 №7

3. А.с. 1453391 СССР, Кл. *G* 05 *F 3/06*
Регулятор переменного тока. / В.В.Богатырев, Н.П.Чистякова/ Бюл.№3. 1989.

УДК 621

А.И. БАЙКОВ, С.Г. СБИТНЕВА

РАЗРАБОТКА БАНКА ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается применение технологии базы данных для анализа нагрузочных режимов силовые полупроводниковые приборы (СПП). Представляется расчет нагрева СПП в различных режимах. Расчет производится на основании паспортных данных, включающих параметры вольт-амперных характеристик СПП и тепловые сопротивления. Выбор параметров СПП и получение расчётных показателей производится путём выполнения подготовленных запросов.

***Ключевые слова*:** силовые полупроводниковые приборы, тепловые режимы, база данных, тепловое сопротивление, нагрев.

Анализ тепловых режимов силовых полупроводниковых приборов является одной из учебно-исследовательских задач кафедры ЭПА НГТУ, решаемых на основе применения технологии баз данных. Рассматриваемая предметная область относится к силовой электронике и может быть представлена как совокупность вертикальных уровней, соответствующих основным рассматриваемым объектам: силовые полупроводниковые приборы (СПП), преобразовательные трансформаторы (ПТ), силовые преобразовательные устройства (СПУ) и горизонтальных уровней, соответствующих методам представления, хранения и

обработки данных. В соответствии с терминологией иерархических представлений они образуют соответствующие деревья: СПП, ПТ, СПУ.

Узлы, или вершины, содержащие информацию о подчинённых вершинах, называются структурными. Вершины, содержащие фактические данные, как правило, являются терминальными. Вершинам соответствуют с наборами атрибутов (столбцов) и записями (строками). Структурные таблицы имеют типовой набор атрибутов (код-идентификатор, имена подчинённых вершин, пояснения). У терминальных таблиц может быть произвольный набор атрибутов в соответствии с содержанием хранимых или получаемых данных. Существенной особенностью базы данных является реализация принципа активности, предусматривающего запуск программных модулей для получения новых данных путём расчётов и математического моделирования. Имена таких модулей хранятся в записях, а исходные данные для них извлекаются путём выполнения соответствующих запросов. Запуск модулей может осуществляться в интерактивном режиме.

На рис. 1 представлена блок-схема корневой части структуры АБД «СЭ» и фрагментов, связанных с анализом тепловых режимов СПП и воспроизведением процессов в автономных инверторах напряжения с использованием собственных математических моделей и моделей *Matlab-Simulink*. Штриховыми линиями показаны запросные связи по передаче данных при анализе тепловых режимов в этом случае. Применение реляционной СУБД не связано с жёстким подчинением отдельной вершины любым другим. Поэтому в процессе развития АБД можно свободно вводить новые вершины и фрагменты в соответствии с представлениями и интересами преподавателя, выступающего в роли соавтора разработчика-администратора. Реализация АБД осуществляется в среде СУБД *ACCESS*, доступной для использования в учебном процессе и позволяющей работать с любыми программными продуктами, совместимыми с *Microsoft*.

База параметров СПП включает данные из справочников о параметрах прямых вольт-амперных характеристиках СПП (r_T, U_{T0}) и расчётные коэффициенты разложений переходных тепловых сопротивлений СПП $z_T(t)$ в ряды экспонент:

$$z_T(t) = \sum_{k=1}^{K_Z} R_k \left(1 - e^{-G_k t}\right). \qquad (1)$$

Для практических расчётов достаточное количество K_Z членов ряда не превышает 10, а сумма установившихся значений экспонент R_k даёт значение теплового сопротивления СПП с конкретным охладителем и интенсивностью охлаждения для длительного режима.

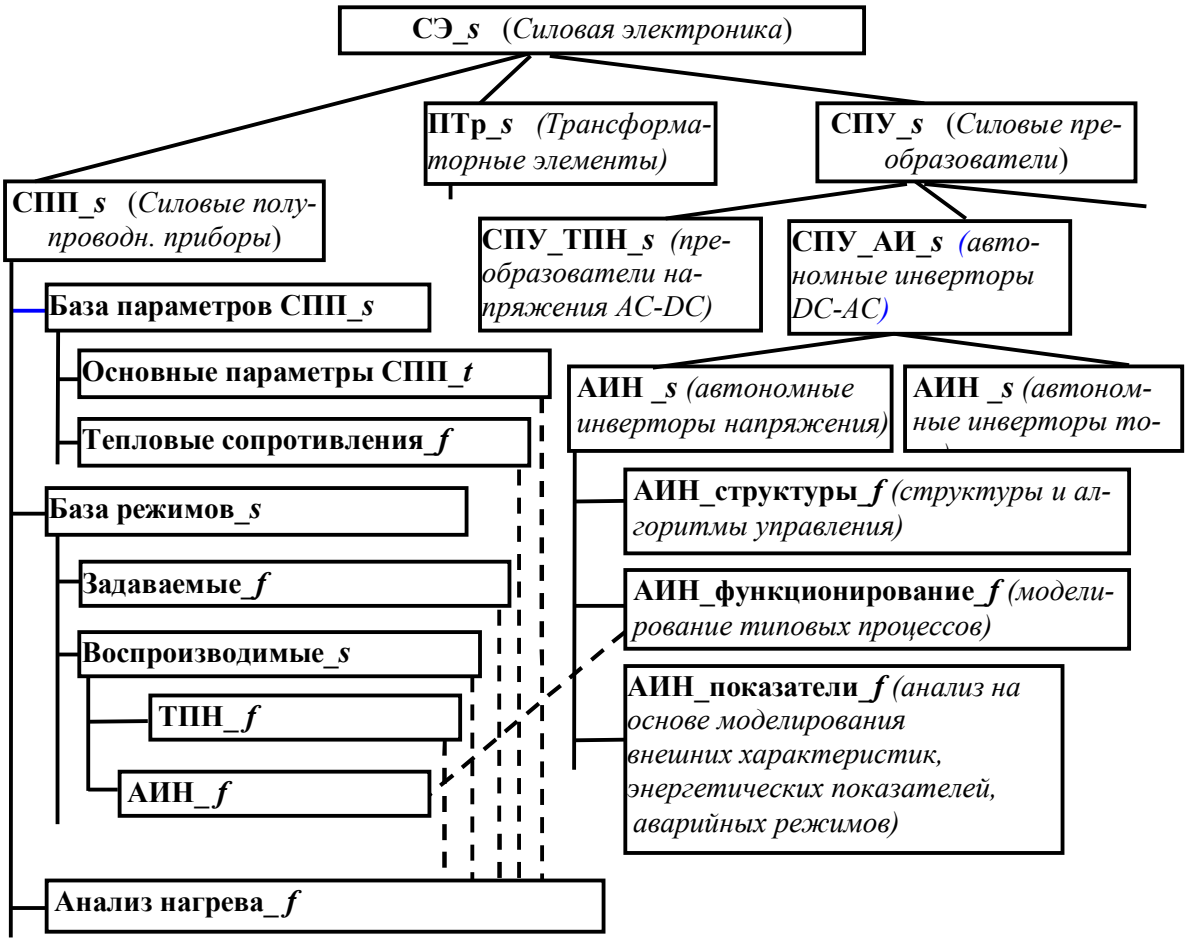


Рисунок 1- Фрагмент структуры БД по преобразовательной технике

Универсальным методом расчёта тепловой нагрузки прибора является интегрирование уравнения теплового баланса

$$\frac{d}{dt}\theta - \Delta p \frac{d}{dt} Z_{\mathrm{T}}(t) = 0 \ , \qquad (2)$$

где Δp - мгновенные потери в СПП при аппроксимации прямой вольт-амперной характеристики прибора лучом, выходящим под углом **arcctg**$R_{\mathrm{т}}$ из точки (U_{T0},0) рассчитываются по формуле

$$\Delta P = i^2 R_{\mathrm{T}} + i U_{T0} \ . \qquad (3)$$

Таблица мгновенных значений тока в анализируемом процессе должна быть получена либо моделированием при неизвестном характере протекания переходного процесса либо сформирована, исходя из известных экспериментальных данных или с использованием упрощенных инженерных методик. Для этого предусматривается обращение к соответствующим вершинам раздела «Моделирование».

При известном массиве мгновенных значений тока СПП можно, используя разложение (1), применить решение (2) в виде интеграла Дюамеля

$$\theta(t) = \sum_{k=1}^{N_Z} \int_0^t \Delta P(x) R_k G_k \exp\left(-G_k (t-x)\right) dx. \qquad (4)$$

При постоянном достаточно малом шаге Δt определения кривой мгновенных значений тока расчёт (4) выполняется по рекурсивной формуле

$$\theta(t) = \sum_{k=1}^{N_Z} \theta_k (t-\Delta t) \exp\left(-G_k \Delta t\right) + \Delta p(t) R_k \left(1 - \exp(-G_k \Delta t)\right).$$

В типичном режиме с периодом T и заданной токовой перегрузкой длительностью τ в начале интервала при известной форме тока усреднённую температуру нагрева полупроводниковой структуры в циклическом режиме можно приближённо найти по формуле

$$\theta_{j.cycle} = \left(U_{T0} I_{TAV.\text{п}} + r_{\text{T}} k_{\Phi}^2 I_{TAV.\text{п}}^2\right)\left(\frac{\tau R_{ja}}{T} + \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) Z_{\tau+T} + Z_{\tau} - Z_T\right) + \theta_a.$$

где $I_{TAV\text{п}}$ – среднее значение тока на периоде T, $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы тока, R_{ja} – установившееся тепловое сопротивление конструкции «кристалл – охлаждающая среда» с учётом интенсивности охлаждения, Z_{τ} и Z_T – значения переходного теплового сопротивления этой конструкции в моменты τ и T, θ_a – температура охлаждающей среды.

На рис.2 показана форма представления результатов расчёта температур нагрева тиристора Т9-250 однополупериодным импульсом допустимого ударного тока и при протекании трёх импульсов аварийного тока опрокидывания инвертора.

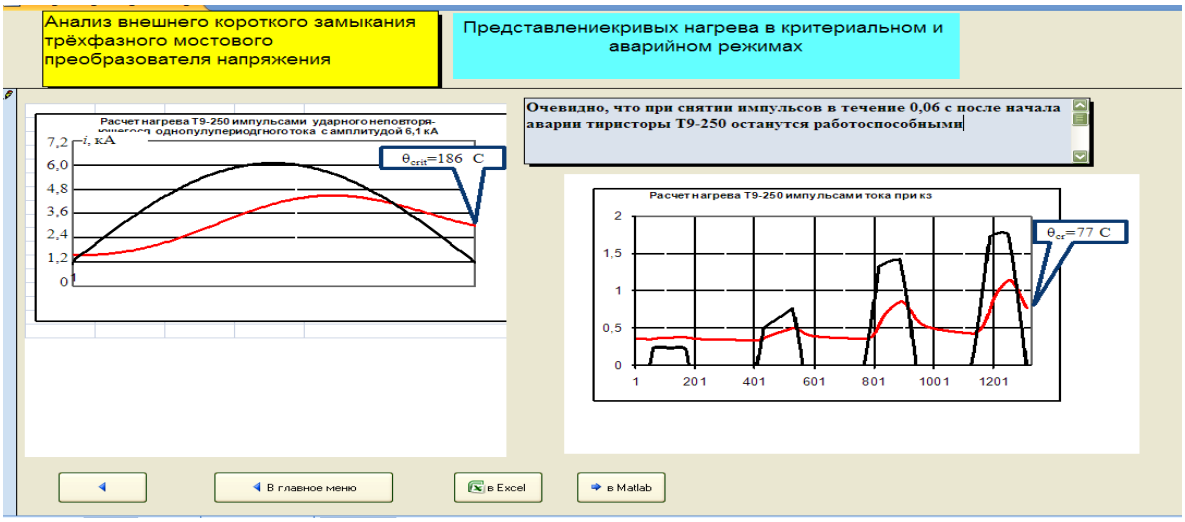


Рис. 2. Форма сравнения температур нагрева тиристора Т9-250

Из справочных данных известно [1], что ударный ток, который выдерживает тиристор при начальной температуре 20 ºС представляет полусинусоидальный импульс длительностью 0,01 с. Температура нагрева полупроводниковой структуры в момент закрывания вентиля и приложения обратного напряжения, как показанно в примере (рисунок 2), является критериальной для оценки опасности аварийного режима. Так, в представленном на рисунке случае видно, что при протекании трёх импульсов аварийного тока до срабатывания электронной защиты тиристор не успевает нагреться до опасного значения температуры.

Благодаря широкому внедрению в расчётную среду программных модулей, сокращается объём хранимых данных. Так, например, кривые мгновенных значений токов во многих случаях могут быть получены без существенных затрат времени в результате выполнения за единицы секунд запросов с вызовом эффективных модулей моделирования. При этом достаточно хранить в памяти лишь исходные данные, определяющие нужные режимы.

Библиографический список:

1. **Чебовский О.Г.** Силовые полупроводниковые приборы: Справочник/ О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин. – 2 изд. перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.- 400 с.

УДК 621.5

А.А. БАШЕВ

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается нелинейная система с переменными параметрами. Решение уравнения системы находится в виде функционального ряда Вольтера. Рассмотрены вопросы сходимости ряда.

***Ключевые слова*:** фазовая система, функциональный ряд Вольтера, система линейных уравнений с переменными коэффициентами.

Широкий класс систем ФАПЧ, следящих систем с фазовым управлением двигателем и т.д. описываются уравнением типа [1]

$$p\varphi^* + K(p)\sin\varphi^* = px \qquad (1)$$

При сложном фильтре нижних частот $K(p)$ это уравнение обращается в нелинейное дифференциальное уравнение высокого порядка. Точное аналитическое решение этого уравнения можно получить только при $K(p)$ =1.

Для решения этого уравнения при $K(p) = \frac{k_0}{Tp+1}$ и входном сигнале

$$x = kt \tag{2}$$

используем функциональный подход.

Подставляя (2) в (1) и делая замену переменной $\varphi = \varphi^* - kt$, получим:

$$p\varphi + K(p)\sin(\varphi + kt) = 0$$

или

$$T\ddot{\varphi}+\dot{\varphi}+k_0(\sin\varphi\cos kt + \cos\varphi\sin kt) = 0 \tag{3}$$

Решение уравнения (3) будем искать в виде ряда Вольтерра [2]:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i \tag{4}$$

Подставляя (4) в (1) и представляя нелинейные функции степенными рядами, и приравнивая члены одинакового порядка слева и справа, получим бесконечную систему линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для составляющих ряда (4):

$$\begin{cases} T\ddot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_1 + k_0 \cos kt \cdot \varphi_1 = -k_0 \sin kt \\ T\ddot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2 + k_0 \cos kt \cdot \varphi_2 = -k_0 \varphi_1 \cos kt \\ \dots \\ T\ddot{\varphi}_i + \dot{\varphi}_i + k_0 \cos kt \cdot \varphi_i = f_i(\varphi_{i-1}, \dots, \cos kt, \sin kt) \end{cases} \tag{5}$$

Решение этой системы найдем, применяя интеграл свертки. Для этого определим импульсную переходную функцию $y(t,\tau)$ линейной части, которая является решением уравнения:

$$T\ddot{y}(t,\tau) + \dot{y}(t,\tau) + k_0\cos kt \cdot y(t,\tau) = \delta(t-\tau) \tag{6}$$

или

$$\ddot{y}(t,\tau) + \frac{1}{T}\dot{y}(t,\tau) = -\frac{k_0}{T} y(t,\tau) \cos kt + \delta(t-\tau)$$

Рассматривая правую часть (6) как входной сигнал некоторой стационарной системы, составим интегральное уравнение для $y(t,\tau)$:

$$y(t,\tau) = \lambda(t-\tau) - \frac{k_0}{T}\int_{\tau}^{t} \lambda(t-\xi)\cos k\xi \cdot y(\xi,\tau)d\xi \tag{7}$$

где $\lambda(t-\tau)$ - импульсная переходная функция системы с усредненными во времени параметрами, т.е. решение левой части (9) при входном воздействии $\delta(t-\tau)$.

Предполагая устойчивость усредненной системы, решим уравнение (7) методом итераций, который является сходящимся [3].

В качестве нулевого приближения выберем

$$y_0(t,\tau) = \lambda(t-\tau) = T(e^{-\frac{1}{T}(t-\tau)} - 1),$$

тогда следующее приближение будет

$$y_1(t,\tau) = \lambda(t-\tau) - \frac{k_0}{T}\int_\tau^t \lambda(t-\xi)cosk\xi \cdot y_0(\xi,\tau)d\xi$$

Продолжая итерационный процесс, можно убедиться, что остальные части малы и можно считать, что

$$y(t,\tau) \approx y_1(t,\tau)$$

Последовательно решая уравнения системы (5), отметим, что в выражениях для φ_1, φ_2, и т.д., которые здесь не приводятся из-за чрезмерной громоздкости, можно выделить множитель $\frac{k_0}{k}$ в первой, второй и т.д. степенях соответственно и можно показать, что ряд Вольтерра (4) сходится при $k > k_0$.

Запишем уравнение (3) в виде

$$T\ddot{\varphi}+\dot{\varphi}+ k_0\cos kt \cdot\varphi = - k_o sinkt - k_0 \cdot$$
$$\cdot\left(\frac{\sin kt}{2!}\cdot\varphi^2 - \frac{\cos kt}{3!}\cdot\varphi^3 + \frac{\sin kt}{4!}\varphi^4 + \dots\right) \quad (8)$$

Пусть $|k_o sinkt| < k_0$, тогда решение (8) можно записать в виде ряда Вольтерра:

$$\varphi = \varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t) + \dots =$$
$$= a_1(t)k_0 + a_2(t)k_0^2 + a_3(t)k_0^3 + \dots \quad (9)$$

Пусть $y(t,\tau)$ удовлетворяют условию

$$|y(t,\tau)| \le Ae^{\nu(t-\tau)},$$

где $A > 0$, $\nu < 0$ постоянные и не зависящие от параметра фильтра.

Рассмотрим уравнение

$$\dot{f} + \nu f = Ak + 2A(e^f - f - 1) \quad (10)$$

Решение этого уравнения $f \equiv 0$ при нулевых начальных условиях и $k = 0$, будет асиптотически устойчиво, тогда ряд Вольтерра:

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots = b_1(t)k_0 + b_2(t)k_0^2 + \dots \quad (11)$$

представляющий решение всегда сходится при $k_0 \le r$ $(r \ne 0)$. Применяя свертку, $f_i(t)$ можно представить в виде:

$$f_i(t) = \int_0^t Ae^{\gamma(t-i)}\Phi_i[f_1(\tau), f_2(\tau), \dots, f_{i-1}(\tau)]d\tau.$$

Можно показать, что для рядов (9) и (11) справедливо

$$|b_i(t)| \ge |a_i(t)| \quad (13)$$

для всех $0 \le t \le \infty$ и всех значений параметров.

Покажем это

$$|f_1| = \left|\int_0^t Ae^{\nu(t-\tau)}k_0 \mathrm{d}\tau\right| \geq \left|\int_0^t |y(t,\tau)|k_0 \mathrm{d}\tau\right| = |\varphi_1|$$

$$|f_2| = \left|\int_0^t Ae^{\nu(t-\tau)}\left(\int_0^\tau Ae^{\nu(\tau-\xi)}k_0 \mathrm{d}\xi\right)^2 \mathrm{d}\tau\right| \geq$$

$$\geq \left|\int_0^t |y(t,\tau)|\left(\int_0^\tau |y(t,\xi)|\, k_0 \mathrm{d}\xi\right)^2 \mathrm{d}\tau\right| = |\varphi_2|$$

и т.д.

Можно сказать, что ряд $f(t)$ является мажорирующим для ряда $\varphi(t)$ и при $k_0 \leq r$ оба ряда сходятся.

Библиографический список

1. Шахгильдян, В.В. Фазовая автоподстройка частоты / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин // Связь. – Москва. 1966.
2. Ван Трис, Г. Синтез оптимальных нелинейных систем управления / Г. Ван Трис// – И.Л., М., 1964.
3. D'Angelo, H. Determination of the impulsive response of two classes of lineer time – varying systems / H/ D'Angela, T. Higgins // – IEEE Ynt.: Conv. Record, 1965, pt 7.

УДК 621.3

А.А. КРАЛИН, В.В. ГУЛЯЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Волжская государственная академия водного транспорта

Рассмотрены вопросы моделирования режимов параллельной работы распределительных трансформаторов, входящих в состав трансфороматорно-тиристорного регулятора напряжения и мощности. Модели выполнены в пакете Simulink. Представлена модель параллельной работы двух трехфазных трансформаторов, с помощью которой произведено исследование электромагнитных процессов при пофазном регулировании.

***Ключевые слова*:** трехфазный трансформатор, параллельная работа трансформаторов, моделирование, Simulink.

В ходе выполнения научной работы было проведено сравнение электромагнитных процессов параллельной работы существующих серийно выпускаемых распределительных трансформаторов с опытным трансформатором, лежащим в основе разрабатываемого трансфороматорно-тиристорного регулятора напряжения и мощности с ключами однонаправленного тока (ТТРНМ ОТ) (рис.

1). Исследование параллельной работы указанных трансформаторов позволяет определить параметры трансформаторно-тиристорного оборудования, дать рекомендации по оптимальному распределению нагрузки.

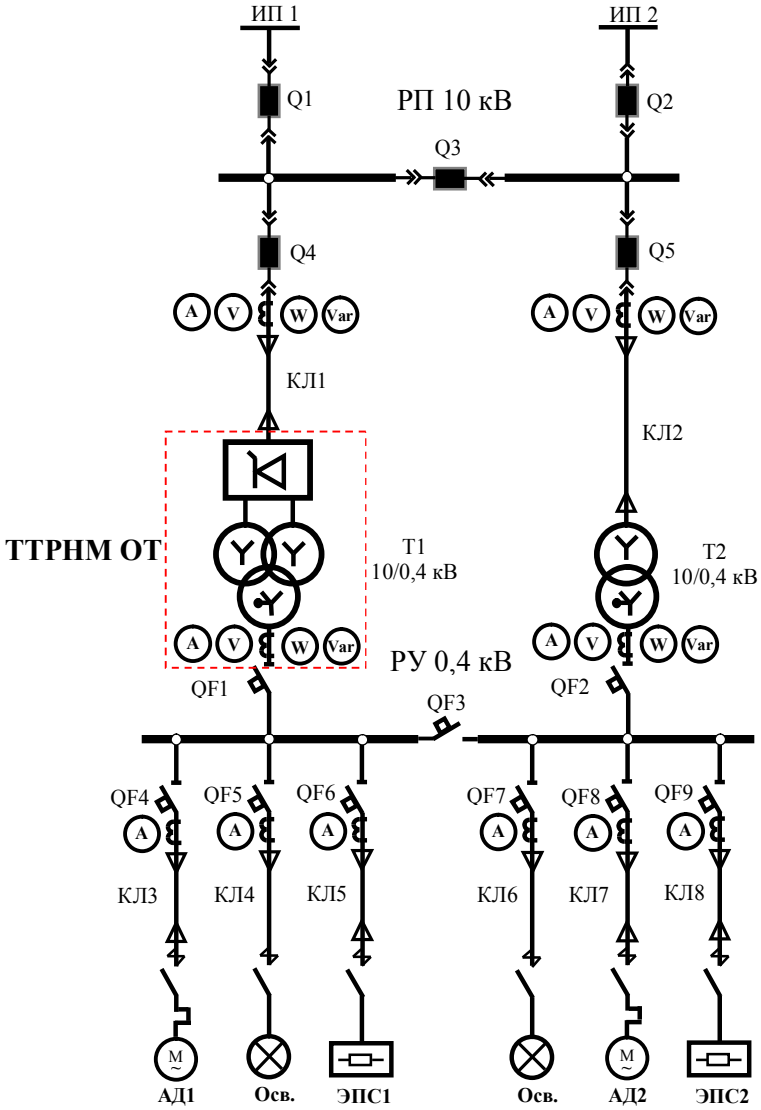


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения с ТТРНМ ОТ

В статье проанализированы задачи формирования оптимального состава оборудования трансформаторной подстанции, включающей трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения и мощности с тиристорными ключами однонаправленного тока (ТТРНМ ОТ). ТТРНМ ОТ содержит регулируемый опытный трансформатор ТСЗН-400/10 и тиристорное переключающее устройство (ТПУ), которое выполняет автоматическое или ручное переключение трех ответвлений каждой фазы обмотки ВН в диапазоне ±5%. Рассмотрены режимы параллельной трансформатора ТСЗН-400/10 с трансформаторами ТС-630/10 и ТС-400/10 (таблица 1). Данные серийные трансформаторы имеют устройство ПБВ с ручным переключением в диапазонах ±2х2,5%. В связи с различными характеристиками ПБВ и ТПУ возникают как симметричные, так и несимметричные режимы параллельной работы данных трансформаторов. Симметричные режимы работы имеют место при одинаковых коэффициентах трансформации, несимметричные - при различных коэффициентах трансформации. Не-

симметричные режимы возникают при пофазном регулировании коэффициента трансформации в одной или двух фазах.

Таблица 1

Параметры трансформаторов, используемых при расчетах

Тип трансформатора	ТС-630/10	ТС-400	ТС-400	ТСЗН-400/10
Номинальное напряжение, кВ	10/0,4	10/0,4	10/0,4	10/0,4
Схема и группа соединения	Y/Yн-0	Y/Yн-0	Y/Yн-0	Y/Yн-0
Ток холостого хода,%	1,7	1,2	1,2	1,2
Напряжение короткого замыкания, %	5,5	5,5	4,6	4,6
Потери холостого хода, Вт	1250	1050	1100	1100
Потери короткого замыкания, Вт	4200	3800	4900	4900

Исследование режимов работы указанных трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Mathcad и Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink.

В системе MATLAB созданы имитационные модели параллельной работы указанных трансформаторов (рис. 2) [1-3]. В качестве примера на рис. 2 представлена имитационная модель параллельной работы трансформаторов ТС-400/10 и ТСЗН 400/10.

По результатам расчетов и выполненного моделирования рекомендуется параллельная работа трансформаторов ТСЗН-400/10 и модернизированного трансформатора ТС-400/10 с напряжением короткого замыкания U_k=(4,5-4,7). При данных параметрах трансформаторов обеспечивается оптимальное распределение нагрузки.

В результате проведенного моделирования определены первичные и вторичные напряжения и токи трансформаторов, уравнительные токи, суммарные потери мощности в режиме холостого хода.

Установлено, что в несимметричных режимах возникают уравнительные токи между параллельно включенными трансформаторами. Наиболее типичным несимметричным режимом является отклонение числа витков обмотки ВН во всех фазах ТСЗН-400/10 на ±5%, а у трансформатора ТС-400/10 установка коэффициента трансформации во всех фазах в номинальное положение. Расчеты и моделирование показывают, что величина уравнительных токов в этом режиме составляет 50-55% от номинального значения тока (рис. 3). Уравнительные токи вызывают неравномерное распределение нагрузки между трансформаторами и дополнительные потери мощности, как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой (рис. 4). Перегрузка трансформатора, имеющего меньший коэффициент трансформации, составляет 128%. Представленные на рис. 3

и 4 результаты моделирования параллельной работы трансформаторов, подтверждены расчетами в системе Mathcad.

При использовании пофазного регулирования коэффициент трансформации ТСЗН-400/10 изменяется независимо в каждой фазе. При этом также возникает уравнительный ток и дополнительные потери. По результатам моделирования установлено, что при изменении коэффициента трансформации в одной фазе на ±5% максимальная величина уравнительного тока составляет 32-36% от номинального тока обмотки НН, а при изменении коэффициента трансформации в двух фазах 45-50%.

Рекомендуется для обеспечения параллельной работы уменьшить нагрузку трансформаторов на 25-30% или уменьшить величину ступени регулирования.

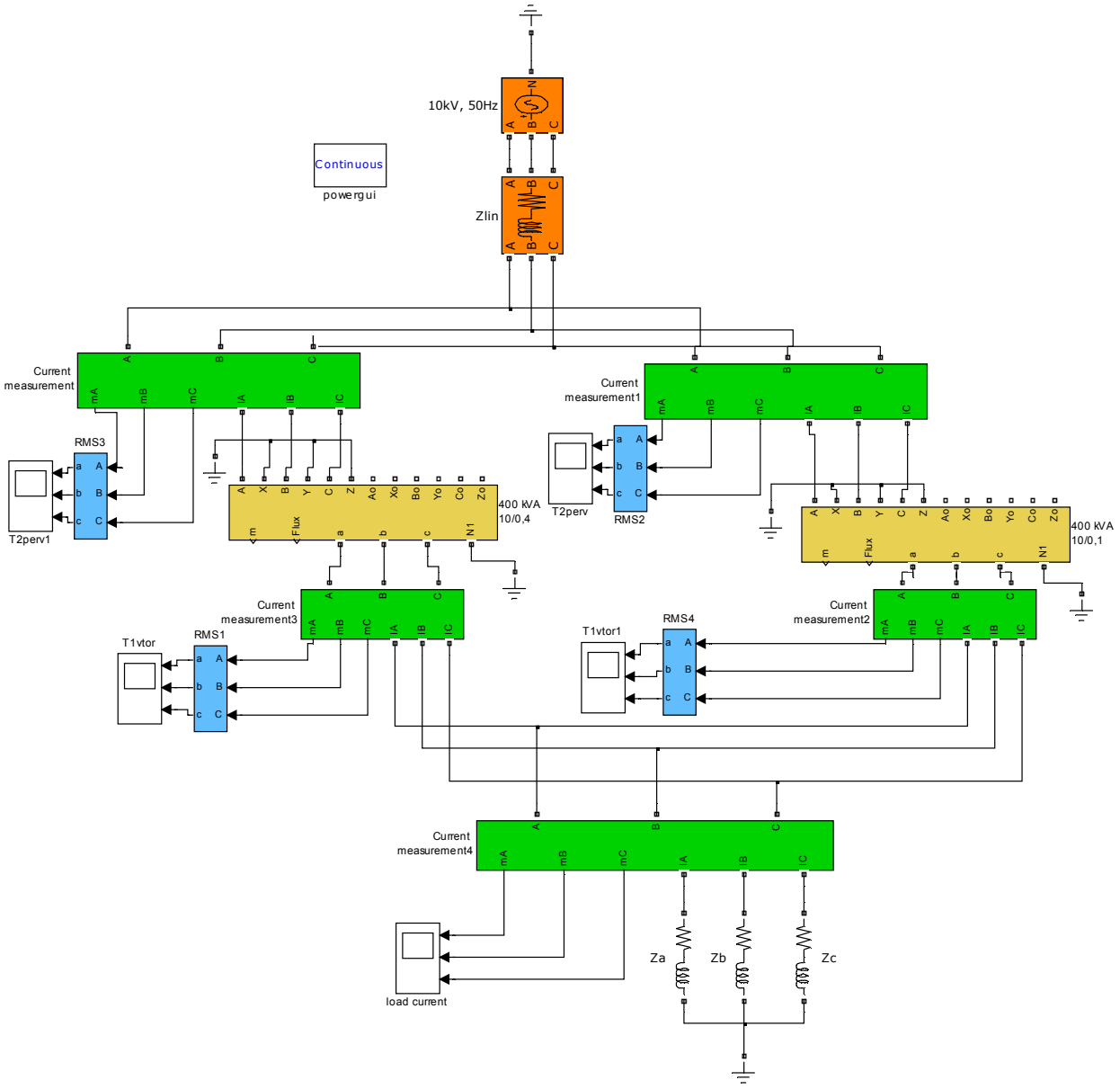
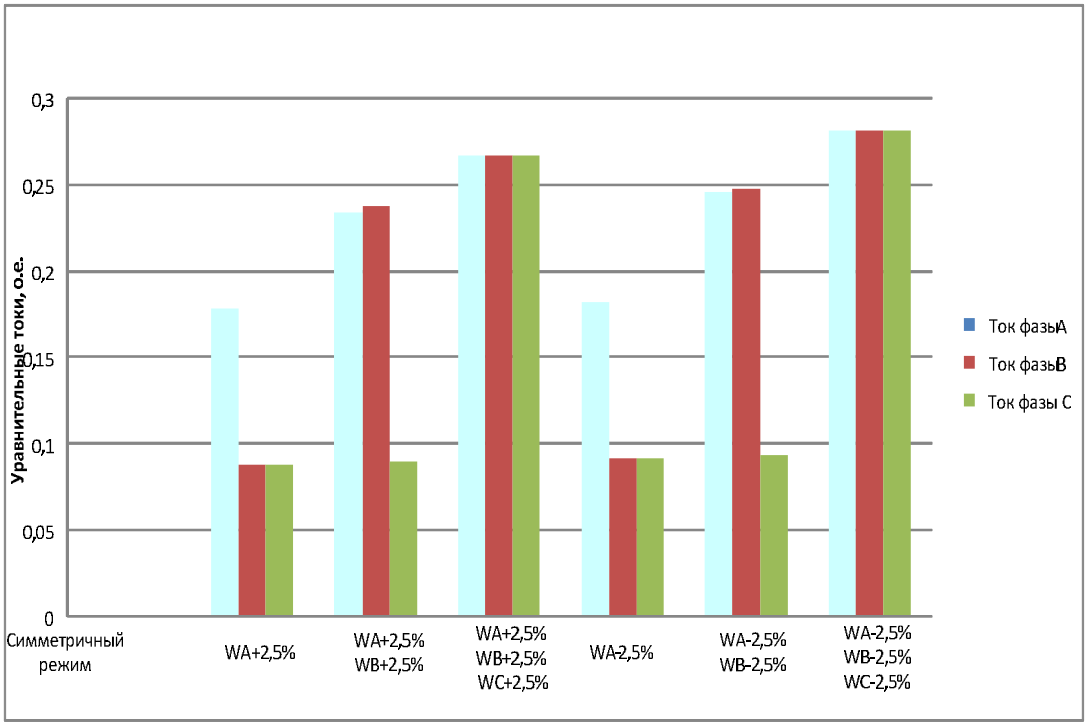


Рис. 2. Имитационная модель параллельной работы двух трансформаторов



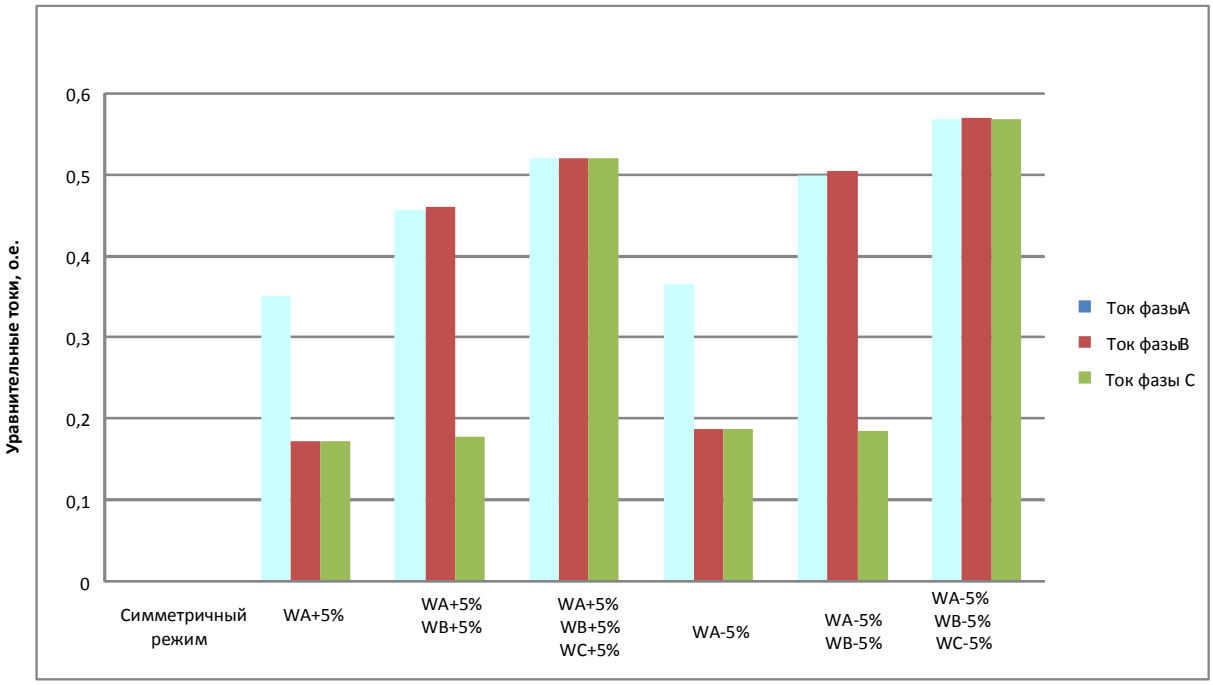


Рис. 2.3. Уравнительные токи при параллельной работе трансформаторов ТСЗН-400/10 и ТС-400/10 с напряжениями короткого замыкания Uk=4,6%

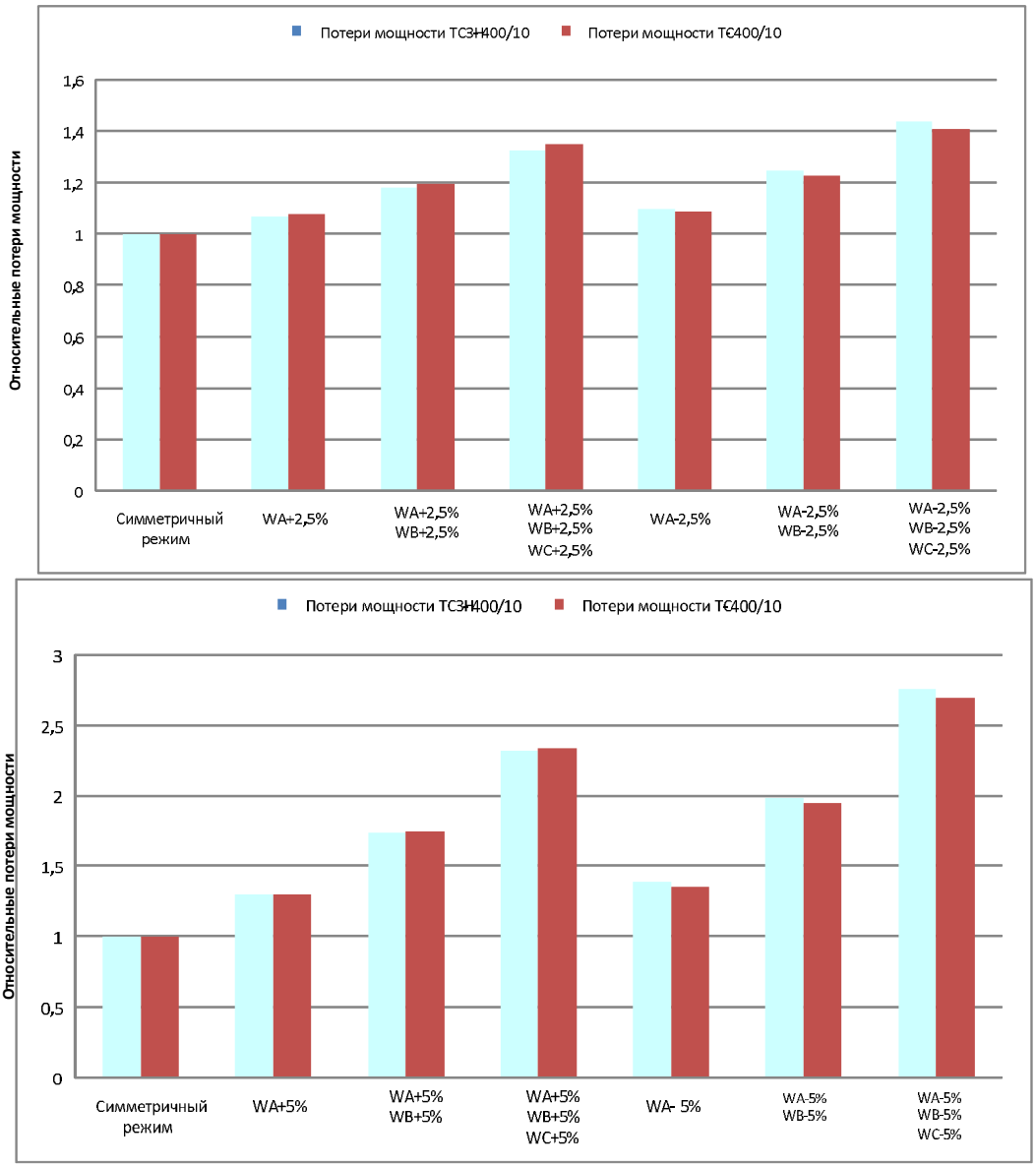


Рис. 2.4. Относительные потери мощности при параллельной работе трансформаторов ТСЗН-400/10 и ТС-400/10 на холостом ходу с напряжениями короткого замыкания Uk=4,6%

Библиографический список

1. **Кралин А.А., Алтунин Б.Ю., Гуляев В.В.** Моделирование нелинейного трехфазного трехстержневого трансформатора в пакете Simulink. Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки 2012» Том 2.- Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012.
2. **Кралин А.А., Алтунин Б.Ю., Гуляев В.В.** Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink. Вестник волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 32Нижний Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО "ВГАВТ", 2012.
3. **Алтунин Б.Ю., Кралин А.А., Карнавский И.А.** Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности. Промышленная энергетика. 2013. № 12.