

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

ОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Посвящается 80-летию со дня рождения проф. С.В. Хватова

Нижний Новгород 2018

УДК 550.534.524

А 437

А 437 Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст./ Нижегород. гос. техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева.–Нижний Новгород, 2018.–312 с.

Изложены проблемные вопросы современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода, а также эффективности систем электроэнергетики.

Содержит научно-технические результаты и разработки регионального центра развития распределенной энергетики на основе возобновляемых источников энергии НГТУ и предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборник включены материалы IV Всероссийской (XXXVII Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». Конференция проведена в рамках Программы развития опорного университета.

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**

УДК 550.534.524

ISBN 978-5-502-01053-5

**© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2018**

СОДЕРЖАНИЕ

К 80-летию со дня рождения Станислава Вячеславовича Хватова.....	6
Дарьенков А.Б., Федоров О.В. Обзор публикационной активности по материалам сборников научно-технических статей «Актуальные проблемы электроэнергетики».....	13
Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	16
Алёшин Д.А., Вихорев Н.Н., Чивенков А.И. Ограничение скорости нарастания сквозного тока полумостового инвертора напряжения.....	16
Стрелков В.Ф., Филатов И.Н., Ершова Е.А. Математическая модель квазирезонансного преобразователя.....	20
Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Способы коррекции угла управления при неустойчивости частоты питающего напряжения.....	31
Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Применение вейвлет – преобразования для определения токов высших гармоник и интергармоник.....	36
Калинин Д.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Титов В.Г. Об обеспечении электромагнитной совместимости в полигонном радиоинтерферометрическом комплексе.....	40
Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырёв Ю.В. Пассивный фильтр гармоник с управляемым реактором.....	43
Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В., Гуляев В.В. Исследование регулировочных характеристик ТРВДН при продольном регулировании выходного напряжения.....	48
Калинин Е.В. Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь.....	53
Борисов А.С., Алёшин Д.А., Вихорев Н.Н. Широотно – импульсная модуляция при параллельной работе инверторов напряжения на общую нагрузку.....	62
Башев А.А. О выборе математических моделей, идентификации и адекватности динамических систем.....	66
Башев А.А. Исследование фазовой системы управления.....	70
Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	74
Байков А.И., Дарьенков А.Б., Куркин А.А., Соснина Е.Н. Анализ энергетических показателей автономной электростанции на основе приливного агрегата.....	74
Дарьенков А.Б., Бердников И.Е., Кечкин А.О., Слuzов А.П., Соколов В.В. Транзисторный электропривод со свойствами источника момента на базе вентильного двигателя.....	91
Дарьенков А.Б., Тихомиров В.А., Сидоров М.В., Ходыкина И.В. Лабораторный стенд для исследования параметров электроэнергии при применении полупроводникового регулятора напряжения в распределительной электросети среднего напряжения (6-10-20 кВ).....	95
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Ермолаев А.И. Тепловые трубы в системах гашения вибрации электромеханических комплексов.....	102
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Степанов К.С. Этапы построения математических моделей магнитоуправляемых гидроопор методом электромеханических аналогий.....	119
Хватов О.С., Кобяков Д.С., Крылов А.В., Юрлов М.Е. Моделирование переходных процессов дизель – генераторных установок постоянной и переменной частоты вращения при параллельной работе.....	129
Смирнов А.Ю., Кралин А.А., Кудряшов Д.А., Александрова Е.Н. Бесконтактный синхронный двигатель с внешним ротором и кольцевой обмоткой якоря.....	135

Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Особенности компьютерного моделирования индукторов для индукционного нагрева в программном комплексе Matlab.....	141
Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Влияние параметров автотрансформатора и нагрузки на переходные процессы при его включении.....	146
Белова Л.В., Кузменков А.Н., Титов В.Г., Шахов А.В. Импульсная система регулирования тока обмоток электромагнитов активного магнитного подшипника.....	151
Хлынин А.С., Титов В.Г. Разработка алгоритма регулирования скорости электропривода газоперекачивающего агрегата на основе уравнений линейной регрессии.....	160
Бычков Е.В., Мотина О.А. Моделирование инвариантных систем автоматического управления электроприводными агрегатами газохранилищ.....	165
Багрецов И.В., Бердников И.Е., Кечкин А.О., Слuzов А.П., Шахов А.В. Интеллектуальный транзисторный инвертор напряжения для низковольтных двигателей переменного тока.....	170
Егоров А.Н., Парфенов В.О., Семёнов А.С. Оценка энергосбережения при применении частотно – регулируемого электропривода на пульпонасосных установках в условиях обогатительных фабрик.....	174
Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ.....	181
Лоскутов А.Б., Зырин Д.В., Демидова А.С., Пронина О.А. Моделирование многоконтурной распределительной сети с твердотельными регуляторами напряжения.....	181
Соснина Е.Н., Веселов Л.Е., Федорчатенко В.И. Методологические рекомендации по внедрению энергоэффективной системы генерирования электроэнергии на ТОТЭ в системы электроснабжения действующих предприятий.....	185
Куликов А.Л., Бездушный Д.И. Оценка информационных признаков для построения алгоритмов релейной защиты.....	190
Куликов А.Л., Осокин В.Ю., Обалин М.Д., Шарафеев Т.Р. Способы определения расстояний до мест двойных замыканий на землю.....	196
Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Пелевин П.С. Варианты объединения волновых и ступенчатых защит электрических сетей.....	202
Куликов А.Л., Шарафеев Т.Р., Осокин В.Ю. Методы анализа кибернападений на энергосистему.....	207
Папков Б.В., Куликов А.Л., Обалин М.Д., Майстренко Г.В. Способ компенсации ошибки различных методов при многостороннем ОМП.....	214
Маслова Н.С., Севостьянов А.А. Анализ влияния показателей качества электрической энергии на работу электроэнергетической системы: электромагнитная составляющая.....	220
Шалухо А.В., Эрдили Н.И., Чиркова А.Е. Вопросы применения возобновляемых источников энергии для электроснабжения автономных потребителей.....	225
Крюков Е.В., Иванов А.В. Разработка имитационной модели системы управления виртуальной электростанцией.....	229
Васенин А.Б., Мирясов Г.М. Оптимальные законы регулирования возобновляемых энергоисточников на удаленных объектах ТЭК.....	235
Грачева Е.И., Наумов О.В. Структурно – балансовая модель промышленных предприятий... ..	241
Грачева Е.И., Алимова А.Н. Энергоэффективность в системах внутрицехового электроснабжения путем замены силовых трансформаторов.....	245
Гольдштейн В.Г., Казанцев А.А., Солдусова Е.О., Проничев А.В. Анализ режимов при применении современных конструкций силовых трансформаторов в распределительных сетях.....	253
Зимин Л.С., Леоненко А.С. Экономия энергоресурсов в электротехнологиях.....	258
Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Камаева О.А. Автоматизация контроля состояния изоляции кабельных линий.....	262

Кузнецов Н.М. Энергоэффективность потребления электроэнергии на горных предприятиях...	267
Павлюков В.А., Ткаченко С.Н., Коваленко А.В. Применение САПР для учебного проектирования распределительных устройств электростанций и подстанций.....	273
Проничев А.В., Солдусова Е.О., Шишков Е.М. Расчет предельных режимов разомкнутой воздушной линии электропередачи.....	279
Сенько В.В., Самойленко Г.Р. Оценка допустимых режимов сложных электроэнергетических систем.....	285
Солдусова Е.О., Проничев А.В., Шишков Е.М. Снижение необходимых резервов мощности в изолированных энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии.....	290
Степанов В.П., Безменова Н.В., Зубарева К.С. Дополнительные потери электроэнергии в электрических сетях, питающих электродуговые сталеплавильные печи.....	295
Степанов В.П., Безменова Н.В., Зубарева К.С. Расчет параметров магнитных полей промышленной частоты в КРУ 6(10) кВ.....	301
Чубаров К.М., Сенько Н.В. Нахождение запаса статической устойчивости трёхузловой электроэнергетической системы в критическом направлении утяжеления с помощью уравнений предельных режимов.....	307

К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ СТАНИСЛАВА ВЯЧЕСЛАВОВИЧА ХВАТОВА



**Хватов Станислав Вячеславович
(1938-2012 гг.)**

**Декан факультета автоматики и электромеханики с 1974 по 2012 гг.,
заведующий кафедрой «Электрические машины» с 1978 по 1987 гг.,
заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных
установок» с 1987 по 2012 гг.**

Родился Станислав Вячеславович 8 августа 1938 г. в г. Дзержинске Горьковской области. Школу закончил с золотой медалью, после чего поступил в Горьковский политехнический институт (ГПИ) им. А.А. Жданова.

В 1960 г. по окончании ГПИ Хватову С.В. была присвоена квалификация инженера-электромеханика по специальности «Электрооборудование промышленных предприятий».

Защитив с отличием диплом, Хватов С.В. по распределению был оставлен для работы в ГПИ в должности ассистента кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭПА). В декабре 1964 г. он был зачислен в аспирантуру, где занимался исследованием системы асинхронного вентильного каскада (АВК). В результате этой работы в производство были внедрены первые промышленные стенды с асинхронным нагрузочным генератором, управляемым по схеме АВК. В ноябре 1967 г. С.В. Хватов успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асинхронный нагрузочный генератор с тиристорным преобразователем в цепи ротора», а в январе 1968 г. ему была присуждена ученая степень кандидата технических наук. С мая 1968 г. по 1969 г. Хватов С.В. работал старшим преподавателем кафедры электропривода,

являлся научным руководителем студенческого научного общества кафедры ЭПА.



1 курс ГПИ, май 1956 г.



Чемпионы Горьковской области среди юношей (24.08.1956 г.)

С 1969 г. по 1972 г. и с 1974 г. по 1977 г. Хватов С.В. работал доцентом кафедры, а в 1972 г. был переведен на должность старшего научного сотрудника для завершения работы над докторской диссертацией по теме: «Вопросы теории и инженерные методы расчета асинхронного электропривода с вентильным преобразователем в цепи ротора», которую он успешно защитил в 1975 г. В 1977 г. ему была присуждена ученая степень доктора технических наук. Результаты исследований диссертационной работы Хватова С.В. были использованы при разработке различных типов вентильных преобразователей для АВК. Эти преобразователи серийно выпускались предприятиями и с большим экономическим эффектом успешно эксплуатировались в разных отраслях народного хозяйства.

В ноябре 1974 г. Хватова С.В. избрали деканом электротехнического факультета, а в ноябре 1978 г. он стал заведующим кафедрой «Электрические машины». В 1987 г. в связи с реорганизацией структуры ФАЭ Станислав Вячеславович был избран заведующим кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

С 1974 г. Станислав Вячеславович являлся председателем Ученого совета факультета.

В 1989 г. Хватову С.В. присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР». В 1993 г. он был избран членом-корреспондентом, а в 2006 г. – действительным членом Академии электротехнических наук.

Станислав Вячеславович всегда с желанием учился, занимался общественной работой. С детства его увлечениями были история и филателия. Особое увлечение, которое оставалось с ним до последних дней, - это футбол. Юношеская команда г. Дзержинск, капитаном которой был молодой Станислав Вячеславович Хватов, в 1956 г. стала чемпионом Горьковской области. Позже, будучи деканом факультета, когда проходили соревнования между студентами и сотрудниками факультета, он всегда был одним из членов команды преподавателей.



2 курс, 1957 г.



Подготовка к защите диплома

Как говорил Станислав Вячеславович: «Спорт – это нужное и полезное дело. Он многому учит и, прежде всего, умению распределять время. Спорт – это вторая жизнь. И сама спортивная борьба формирует характер, учит выкладываться до конца».

Такие простые слова как нельзя более точно характеризуют этого человека. Он всегда был очень пунктуален, ко всем делам подходил обстоятельно, решения принимал взвешенно, при этом выкладывался полностью во всех начинаниях.



Защита диплома, 16.06.1960 г.



К его образу как человека и ученого очень подходят слова Н.А. Заболоцкого: «Не позволяй душе лениться! Чтоб в ступе воду не толочь, душа обязана трудиться и день и ночь, и день и ночь!». И такая привычка трудиться, не тратить время зря, помогла С.В. Хватову многого достичь в жизни. Под его руководством на факультете:

- открыты специальности «Электрооборудование и автоматика судов», «Электротехнологические установки и системы», «Электрический транспорт», «Электрооборудование автомобилей и тракторов»; «Промышленная электроника»;

- модернизированы и созданы новые лаборатории по профилирующим дисциплинам;

- открыта магистратура;

- в рамках направлений «Разработка и исследование энергосберегающих электроприводов и преобразователей для промышленных установок» и «Импульсные системы вторичного электропитания» выполнены работы с Заволжским моторным заводом, ОАО «Гидромаш», ОАО «Красное Сормово», ИПФ РАН г. Н. Новгород, НИИРТ г. Н. Новгород;

- открыта подготовка специалистов по электроприводу и электроснабжению в г. Выксе (филиале НГТУ);

- на предприятиях «Нижегородэлектротранс», Горьковском заводе аппаратуры и связи им. Попова (ГЗАС), Сормовском электромонтажном предприятии, заводе фрезерных станков (г. Н.Новгород) созданы филиалы кафедр ФАЭ.



В диссертационном совете, который открыл и многие годы возглавлял Станислав Вячеславович, защищено более 175 кандидатских и докторских диссертаций. География соискателей - практически вся Россия.



Заседание диссертационного совета Д 212.165.02, 2005 г.

В 2001 г. под руководством С.В. Хватова в НГТУ была проведена III Международная (XIV Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. С 1982 г. в НГТУ проводится, основанная Хватовым С.В., региональная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики».



Пленарное заседание III Международной (XIV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, 2001 г.
(слева направо: Тишков К.Н., Хватов С.В., Юньков М.Г., Кириенко В.П., Марков В.В.)



Пленарное заседание 24-й региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики», посвященной 100-летию со дня рождения проф. Бамдаса А.М. и проф. Мукосеева Ю.Л., 2005 г.
(в президиуме – Лоскутов А.Б. и Хватов С.В.)

Как ученый и педагог С.В. Хватов пользовался заслуженным авторитетом в России и в странах бывшего СССР. Он был членом Учебно-методического объединения вузов по образованию в области энергетики и электротехники, являлся постоянным членом оргкомитетов международных конференций по автоматизированному электроприводу.

За добросовестный труд С.В. Хватов был награжден знаком «Почётный работник высшего профессионального образования» и медалью ордена «Заслуги перед Отечеством» II степени.

Факультет, руководимый С.В. Хватовым, всегда был в числе лидеров в области развития науки и техники. Высокая техническая эрудиция, компетентность в проблемах учебного процесса, природный талант руководителя и организатора, высокая общая культура и интеллигентность – все это позволяло профессору С.В. Хватову успешно руководить факультетом автоматики и электромеханики и кафедрой электропривода.

Скончался Станислав Вячеславович Хватов 26 февраля 2012 года на 74-м году жизни.

Дарьенков А.Б.

УДК 621

А.Б. Дарьенков, О.В. Федоров

**ОБЗОР ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ
ПО МАТЕРИАЛАМ СБОРНИКОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Вы держите в руках сборник научно-технических статей образовательно-научного института электроэнергетики (ИНЭЛ) НГТУ им. Р.Е. Алексеева, который впервые вышел в свет в 1982 г. Этому событию предшествовало решение ученого совета ИНЭЛ о ежегодном проведении конференции по вопросам преобразования параметров электрической энергии, автоматизированного электропривода и эффективности систем электроэнергетики и экономии энергоресурсов, приурочив её проведение ко дню энергетика.

Для работы над ежегодным сборником формировалась редакционная коллегия, определяющая целесообразность принятия представляемых статей к опубликованию. В различные года членами этой коллегии являлись: доктора технических наук, профессора – С.В. Хватов, В.П. Кириенко, Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, Б.В. Папков, Е.Н. Соснина, В.Г. Титов, А.И. Чивенков; кандидаты технических наук, доценты – А.А. Башев, Е.В. Бычков, А.Б. Дарьенков, А.А. Кралин, К.П. Слядзевская и другие сотрудники, работающие на кафедрах ИНЭЛ – электрооборудование, электропривод и автоматика; электроэнергетика и электроснабжение; силовая электроника; теоретическая и общая электротехника, а также в научно-исследовательской лаборатории силовой электроники.

В сборниках имеются публикации, посвященные юбилеям, основателям научных школ в НГТУ им. Р.Е. Алексеева: А.М. Бамдасу, Л.М. Зельцбургу, Ю.Л. Мукасееву, В.И. Плескову, С.В. Хватову, С.Н. Шевчуку.

В изданиях публикуются статьи не только преподавателей и инженеров университетов, но и представителей различных предприятий и научно-исследовательских организаций Нижнего Новгорода и других городов РФ (Москва, Самара, Уфа, Апатиты, Казань, Екатеринбург, Челябинск, Иваново, Чебоксары, Магнитогорск, Воронеж, Королев, Мирный, Саранск и др.), а также магистрантов и студентов. В представленных статьях отражались проблемы и возможные пути их решений в ООО «ГАЗПРОМ», ООО «ЭНЕРГОУЧЕТ», авиационной промышленности и атомной энергетике, на водном, трубопроводном и железнодорожном транспорте, ОАО «Гипрогазцентр», ООО «Промполиграф НН», ОАО «ФСК ЕЭС», ООО «Нижэнергопроект», ОАО «Волгосельэлектропросетьстрой», НФ ОАО «Энергобаланс», НИЦ КНЦ РАН, ООО «Интермодуль», ООО «Экологические технологии», на предприятиях металлургии и др. Имеются публикации и специалистов из – Кие-

ва, Гомеля, Риги, Винницы и др. Приведенный краткий обзор географии (городов и регионов) и предприятий (по отраслям экономике и сферам деятельности) свидетельствует о востребованности профильными специалистами данного издания.

В табл. 1 приводятся количественные оценки, характеризующие привлекательность публикационной активности за 15 лет.

Таблица 1

Показатели публикационной активности

Год	Общее кол-во опубликованных статей	Кол-во авторов/авторов из других организаций города	Кол-во авторов из других регионов	Кол-во статей (авторов) по разделам сборника			Объем издания стр./ усл.- печ. листы
				Преобразователи параметров электрической энергии (авторов)	Автоматизированный электропривод (авторов)	Эффективность систем электроэнергетики и экономия энергоресурсов (авторов)	
1	2	3	4	5	6	7	8
2000	44	119/-	-/-	12(29)/24,37%	20(60)/50,42%	12(30)/25,21%	80/-
2004	36	70/-	-/-	20(31)/44,28%	10(27)/38,57%	6(12)/17,14%	64/4,00
2005	34	81/18	-/-	-(-)/-	-(-)/-	-(-)/-	120/15
2006	66	144/35	25/37,87%	29(66)/42,42%	21(44)/30,55%	16(39)/24,24%	240/30,00
2007	43	97/16	11/11,34%	-(-)/-	-(-)/-	-(-)/-	192/24,25
2008	37	89/22	4/4,49%	4(8)/8,98%	16(35)/39,32%	17(46)/51,68%	154/17,00
2009	36	82/18	1/1,21%	9(24)/29,26%	14(31)/37,80%	13(27)/32,92%	188/18,00
2010	33	74/14	-/-	10(16)/30,30%	9(24)/27,27%	14(34)/42,42%	144/18,25
2011	29	74/23	2/2,70%	6(11)/20,68%	11(33)/37,93%	12(30)/41,37%	140/17,75
2012	39	100/20	9/9,00%	7(12)/12,00%	25(66)/66,00%	7(22)/22,00%	194/12,25
2013	35	92/18	6/6,52%	5(14)/14,28%	12(35)/34,28%	18(43)/51,42%	168/10,75
2014	43	130/25	7/5,38%	9(24)/18,46%	16(47)/36,15%	18(59)/45,38%	206/13,00
2015	33	88/13	19/21,59%	10(27)/30,68%	15(39)/44,36%	8(22)/25,00%	170/10,75
2016	33	102/8	22/21,56%	7(18)/17,64%	16(56)/54,90%	10(28)/27,45%	202/12,75
2017	39	101/18	16/15,84%	8(19)/18,81%	14(39)/38,61%	17(43)/42,57%	212/13,25
2018	50	144/13	46/31,94%	11(28)/19,44%	15(51)/35,42%	24(65)/45,14%	312/21,00

В табл. 1 и 2 отражены дополнительные расчетные показатели, позволяющие расширить информационную базу публикационной активности:

- в графе 4 – знаменатель – процент авторов из других регионов относительно общего количества авторов, указанных в сборнике

- в графах 5-7 – в числителе отражено количество статей, в скобках указано количество авторов, а в знаменателе – процент авторов от общего количества авторов, указанных в сборнике.

В табл. 2 на основании численных значений, отраженных в табл. 1, приведены итоговые оцениваемые показатели за исследованный период.

Таблица 2

Итоговые оцениваемые показатели за исследованный период

Показатели		Численное значение показателя
Общее количество опубликованных статей		640
Количество авторов/авторов из других организаций города		1587/261
Количество авторов из других регионов		168/10,58%
Количество статей (авторов) по разделам сборника	Преобразователи параметров электрической энергии (авторов)	147(327)20,60%
	Автоматизированный электропривод (авторов)	214(587)36,99%
	Эффективность систем электроэнергетики и экономия энергоресурсов (авторов)	192(600)37,81%
	Объем издания стр./усл.- печ. листов	2474+/217+

Итоговая табл. 2, как и табл. 1, позволяют проанализировать относительную значимость разделов сборника: по количеству опубликованных статей и количеству участвующих в публикациях авторов из различных университетов; по связям ИНЭЛ с различными регионами РФ, промышленными предприятиями с разнообразными сферами деятельности.

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

УДК 621.314

Д.А. Алёшин, Н.Н. Вихорев, А.И. Чивенков

ОГРАНИЧЕНИЕ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ СКВОЗНОГО ТОКА ПОЛУМОСТОВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке схемотехнических решений повышения надежности работы преобразователя постоянного напряжения в переменное и защиты силовых полупроводниковых ключей от аварийных значений пропускаемого тока. Описана имитационная модель, позволяющая исследовать период возникновения и протекания сквозного тока стойки полумостового инвертора напряжения, а также определить соотношения токоограничивающих индуктивностей и определить влияние коэффициента магнитной связи.

The article is devoted to the development of circuit-based solutions to increase the reliability of the operation of the DC-AC converter and protect semiconductor switches from the fault current values. The simulation model allowing to investigate the period of occurrence and flow of the through current of the half-bridge voltage inverter rack, as well as to determine the ratio of current-limiting inductances and to determine the influence of the magnetic coupling coefficient, is described.

Ключевые слова: токоограничение, короткое замыкание, дроссель насыщения, магнитосвязанные индуктивности.

Key words: current limitation, short circuit, saturation inductor, magnetically coupled inductors.

Повышение надежности остается одной из основных тенденций как для электроники в целом, так и преобразовательной техники в частности.

Современные подходы к обеспечению бесперебойной работы полупроводниковых преобразователей сводятся к защите силовых ключей от критических значений токов и напряжений, а также ограничению скоростей нарастания последних до допустимых значений. Для достижения перечисленных целей применяются дроссели, ограничивающие скорость нарастания тока через транзистор, а также сочетания конденсаторов и резисторов, ограничивающих скорость нарастания напряжения на ключе. Совместно с этими классическими решениями могут применяться ограничители напряжения, драйверы и датчики, контролирующие состояние энергосистемы в целом и обеспечивающие своевременное отключение прибора при наступлении аварийной ситуации.

Одним из способов расширения возможностей системы защиты транзисторов в инверторе напряжения [1] предлагается применение магнитосвязанных дросселей насыщения, установленных в цепи верхнего и нижнего ключа (рис. 1).

Устройство включает в себя емкостный накопитель, образованный конденсаторами $C1$, $C2$, силовые транзисторы $VT1$, $VT2$, обратные диоды $VD1$, $VD2$, дроссель $L\phi$ и конденсатор $C\phi$, образующие выходной фильтр, нагрузочный элемент $Rн$, а также двухобмоточный дроссель L .

В нормальном режиме работы транзисторы $VT1$ и $VT2$ открываются поочередно в соответствии с сигналами ШИМ - генератора и не имеют периода одновременной работы. Однако при возникновении внештатных ситуаций (наведение помехи на затворы транзисторов, «защелкивание» одного из транзисторов при превышении допустимого dU/dt и т.д.) могут быть обеспечены условия для протекания «сквозного» тока через оба транзистора. Возникший «сквозной» ток ограничивается лишь внутренним сопротивлением емкостного накопителя, транзисторов и проводов и может достигать значений, составляющих тысячи и десятки тысяч ампер, что значительно превышает допустимые рабочие параметры большинства транзисторов.

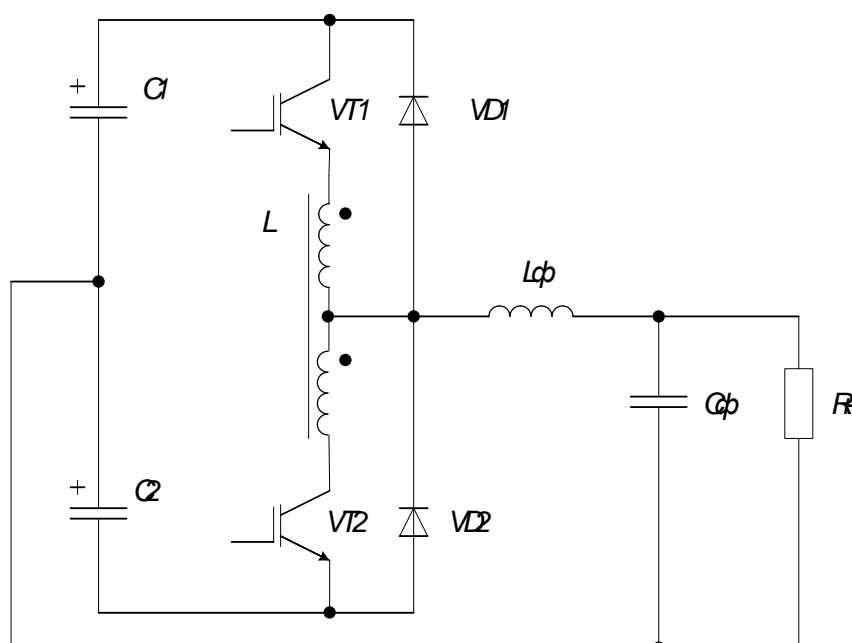


Рис. 1. Полумостовой инвертор с двухобмоточным дросселем

В предлагаемом схемотехническом решении при возникновении условий для протекания «сквозного» тока скорость его нарастания будет ограничена за счет взаимной работы двух индуктивностей. Введение в работу второй обмотки приводит к вычитанию ее магнитного потока из магнитного потока первой обмотки. Несмотря на то, что суммарный поток (следовательно, и ток) продолжает расти, скорость его нарастания будет замедлена.

Для пояснения принципа работы предлагаемого узла защиты разработана имитационная модель (рис. 2) энергосистемы для временного интервала, соответствующего возникновению «сквозного» тока.

Модель выполнена в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink и включает в себя: источники питания, измеритель тока, магнитосвязанные дроссели и ключ для имитации короткого замыкания в стойке инвертора. Элементы, задействованные при моделировании, входят в состав библиотек Simscape/SimPowerSystem и Simscape/SimElectronics.

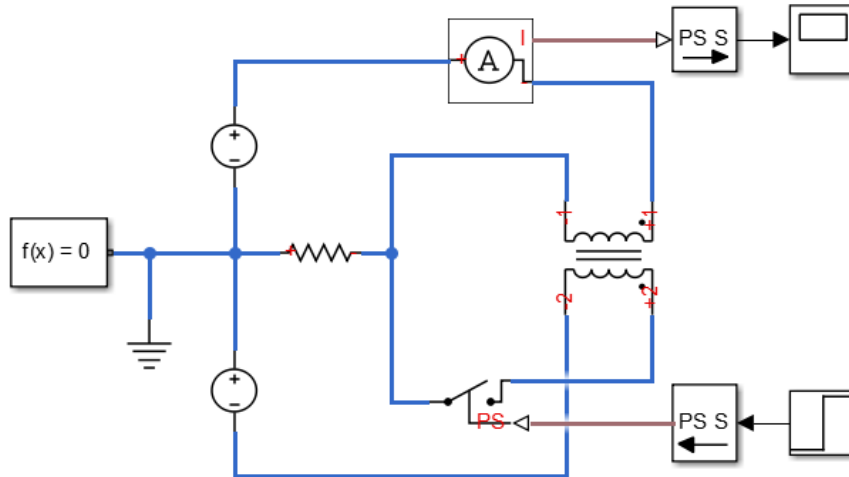


Рис. 2. Имитационная модель полумостового инвертора

Полученная в результате моделирования диаграмма тока в цепи верхнего транзистора приведена на рис. 3.

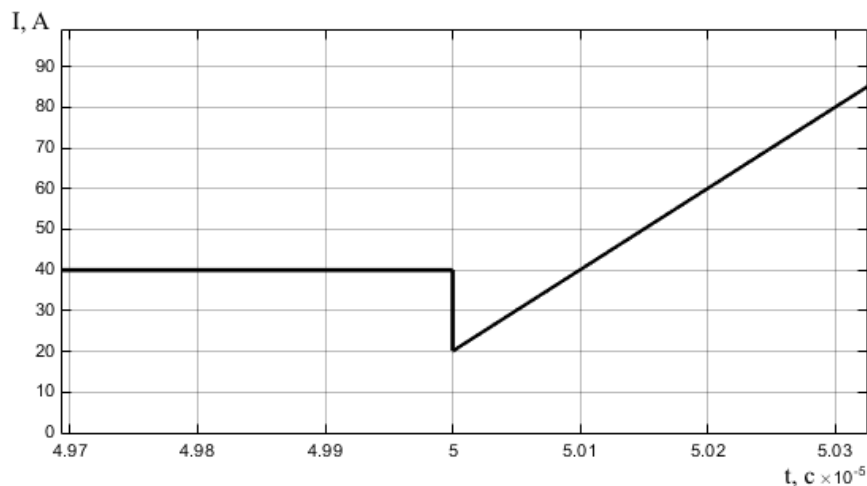


Рис. 3. Временная диаграмма тока через транзистор при одновременной работе ключей

Из полученной временной диаграммы следует, что возможно обеспечить кратковременное снижения тока, при наступлении аварийного режима, а также ограничить скорость его нарастания, тем самым формируя временное окно в несколько десятков нано - или микросекунд, необходимое для срабатывания

защиты драйвера или другого элемента системы управления, отключающего преобразователь. Ограничение скорости нарастания тем сильнее, чем выше значение индуктивности дросселя и коэффициент магнитной связи между обмотками.

Для снижения электрических потерь, обусловленных введением дополнительных элементов в цепь протекания тока нагрузки, целесообразно применять дроссели насыщения [2]. В случае наступления аварийной ситуации, вторая обмотка дросселя выведет первую обмотку из режима насыщения, тем самым обеспечив режим токоограничения. Введение насыщающихся дросселей позволяет ограничить скорость нарастания тока во временной период, соответствующий открыванию транзистора. В период открытого состояния ключа дроссель находится в режиме насыщения и не влияет на протекающий при этом ток нагрузки.

Библиографический список

1. **Вихорев, Н.Н.** Автоматизация запуска инвертора напряжения с применением средств быстрого прототипирования систем управления / Н.Н. Вихорев, А.И. Чивенков, С.Ю. Панфилов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 17–22.
2. Пат. 2168825 Российская Федерация: МПК H02H7/122, H02M7/5387. Однофазный мостовой транзисторный инвертор / В.Г. Сторожик; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет – №2000100893/09; заявл. 11.01.2000; опубл. 10.06.2001. Бюл. № 16.

УДК 621.3

В.Ф. Стрелков, И.Н. Филатов, Е.А. Ершова**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследован квазирезонансный преобразователь системы электроснабжения ограниченной мощности. Разработана его математическая модель. Предложен алгоритм работы с математической моделью. Определены в реальном времени электромагнитные процессы и проведен их анализ. Проведены экспериментальные исследования. Получены рациональные параметры его компонентов.

The article describes a mathematical model of a quasi-resonant converter for a power supply system of limited power. The authors have proposed an algorithm for working with the mathematical model. They have determined, in real time, electromagnetic processes, carried out their analysis and experimental research. The rational parameters of the converter components have been obtained.

Ключевые слова: система электроснабжения, гибридная ветроэнергетическая установка, дизель-электрическая станция, радиолокационная станция, квазирезонансный преобразователь.

Key words: electric power supply system, hybrid wind power plant, diesel-electric station, radar station, quasi-resonant converter.

В настоящее время традиционными источниками электрической энергии для локальных потребителей, централизованное энергоснабжение которых невозможно или нерентабельно в силу удаленности, являются гибридные ветроэнергетические установки, состоящие из дизель электрической станции на основе дизельных электроагрегатов и ветрогенераторов. Типичными примерами таких систем электроснабжения (СЭС) являются системы небольшой мощности, составляющие, как правило, несколько десятков киловатт. Локальные СЭС обеспечивают энергоснабжение электрооборудования, радиотехнических систем безопасного мореплавания (воздухоплавания) и бытовые потребности многочисленного персонала [1 - 3].

Средняя мощность передающих устройств радиотехнических систем достигает нескольких десятков кВт, характер потребления – импульсный.

В настоящее время, для электроснабжения радиотехнических систем необходимы преобразователи, обладающие высоким уровнем электромагнитной совместимости, широким диапазоном регулирования выходного напряжения, малыми массой и габаритами.

В таких СЭС целесообразно применение квазирезонансных преобразователей (КРП) [4]. Токи в его цепях имеют колебательный характер, в результате чего включение и выключение транзисторов всегда происходит при нулевых

значениях тока. При использовании КРП значительно упрощается решение задач как внутренней, так и внешней электромагнитной совместимости [4, 5].

Сокращение ширины спектра и уровня радиопомех приводит к снижению «шумов», распространяющихся в цепях радиотехнических систем кондуктивным и индуктивным путем, а также улучшает тактико-технические характеристики. Актуальной является задача исследования КРП с фиксированной частотой [6-9], требуемым широким диапазоном регулирования выходного напряжения и естественным ограничением тока нагрузки и питающих емкостные накопители (НК) передающих устройств РЛС.

На рис. 1 представлен вариант исполнения КРП по мостовой схеме.

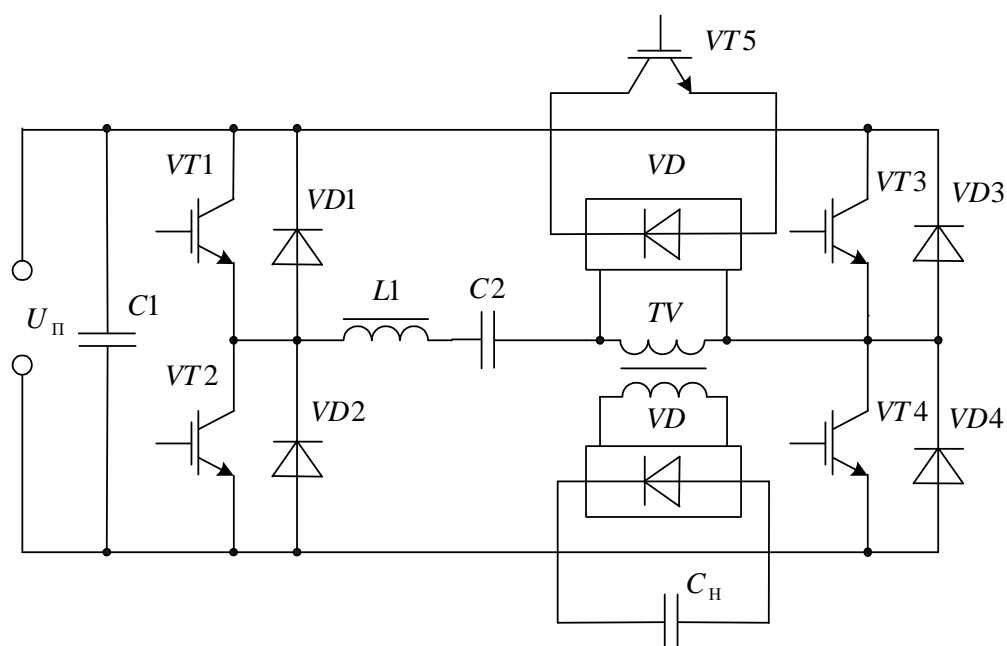


Рис. 1. Принципиальная схема КРП:

$VT1, VT2, VT3, VT4$ – транзисторы инвертора; $VT5$ – регулирующий транзистор; $VD1, VD2, VD3, VD4$ – шунтирующие диоды; VD – выпрямительные мосты; $U_{п}$ – напряжение питания; $C1$ – конденсатор входного фильтра, $C_{н} - CH$; $L1, C2$ – дроссель и конденсатор резонансного контура; $TV1$ – трансформатор

В преобразователе с полумостовой схемой входной конденсатор $C1$ состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов. При постоянном уровне напряжений каждого из них процессы в полумостовой схеме не отличаются от представленной. В схемах замещения и в расчетных формулах в этом случае следует значение напряжения источника питания $U_{п}$ заменить на $U_{п} / 2$.

С целью упрощения анализа электромагнитных процессов в КРП приняты следующие допущения: вентиляльные элементы обладают свойствами идеальных ключей; трансформатор $TV1$ идеален (магнитная цепь линейна, индуктивные и

активные сопротивления обмоток, потери в магнитопроводе равны нулю), коэффициент трансформации равен единице; потери в C_2 , а также конденсаторе фильтра C_1 равны нулю; потери мощности КРП сосредоточены в сопротивлении R_1 , включенном последовательно с элементами резонансного контура.

При сделанных допущениях по принципиальной схеме КРП (рис. 1): U_H – напряжение НК; L_1 , C_2 , – индуктивность, емкость дросселя L_1 и конденсатора C_2 ; R_1 – активное сопротивление элементов резонансного контура; L_k – индуктивность рассеяния трансформатора TV_1 .

В каждом полупериоде работы зарядного преобразователя можно выделить интервалы, порядок и наличие которых может различаться в зависимости от режима работы преобразователя (момента включения транзисторов VT_1 , VT_2 , VT_3 , VT_4 , VT_5).

Режим 1. В случае отсутствия импульсов управления на транзисторе VT_5 в каждом периоде работы данного устройства в этом режиме можно выделить следующие интервалы непрерывности:

- интервал проводимости ключей VT_1 и VT_4 (VT_2 и VT_3);
- интервал проводимости диодов VD_1 , VD_2 (VD_3 , VD_4);
- интервал бестоковой паузы.

Режим 2. В случае подачи импульса управления на транзистор VT_5 на интервале проводимости транзисторов диагонали в каждом периоде работы данного устройства можно выделить следующие интервалы непрерывности:

- интервал проводимости ключей VT_1 и VT_4 (VT_2 и VT_3) с передачей энергии в нагрузку;
- интервал проводимости ключей VT_1 , VT_4 (VT_2 , VT_3) и VT_5 с передачей энергии в нагрузку;
- интервал проводимости ключей VT_1 , VT_4 (VT_2 , VT_3) и VT_5 возвратом энергии в накопительный конденсатор C_1 ;
- интервал проводимости диодов VD_1 , VD_2 (VD_3 , VD_4) и VT_5 возвратом энергии в накопительный конденсатор C_1 ;
- интервал бестоковой паузы.

Режим 3. В случае подачи импульса управления на транзистор VT_5 на интервале проводимости обратных диодов VD_1 и VD_4 в каждом периоде работы данного устройства в этом режиме можно выделить следующие интервалы непрерывности:

- интервал проводимости ключей VT_1 и VT_4 (VT_2 и VT_3) с передачей энергии в нагрузку;
- интервал проводимости диодов VD_1 и VD_2 (VD_3 и VD_4) с передачей энергии в нагрузку;
- интервал проводимости диодов VD_1 , VD_2 и (VD_3 , VD_4) и ключа VT_5 с передачей энергии в нагрузку;
- интервал проводимости диодов VD_1 , VD_2 (VD_3 , VD_4) и ключа VT_5 с возвратом энергии в накопительный конденсатор C_1 ;
- интервал бестоковой паузы.

Режим 4. В следующем режиме, в отличие от режима II и режима III, ток через транзисторы $VT1$ и $VT4$ успеваает упасть до нуля, но энергии накопленной в конденсаторе $C2$ не достаточно для отпираания обратных диодов $VD1$ и $VD4$. В этом случае ток через диоды пойдёт с момента подачи импульса управления на транзистор $VT5$.

В результате, в каждом периоде работы данного устройства в этом режиме можно выделить следующие интервалы непрерывности:

- интервал проводимости ключей $VT1$ и $VT4$ ($VT2$ и $VT3$) с передачей энергии в нагрузку;
- интервал бестоковой паузы;
- интервал проводимости диодов $VD1$, $VD4$ ($VD2$, $VD3$) и ключа $VT5$ с возвратом энергии в накопительный конденсатор $C1$;
- интервал бестоковой паузы.

Происходит циклическое переключение транзисторов $VT1$, $VT2$, $VT3$, $VT4$, $VT5$ и смена их интервалов проводимости. Каждому интервалу проводимости соответствует система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы. Определенные интервалы проводимости и их системы дифференциальных уравнений образуют математическую модель КРП.

Дифференциальные уравнения, приведены к относительным единицам.

Относительные значения переменных и параметров модели преобразователя определяются выражениями:

$$U_H^* = \frac{U_H}{U_{баз}}; \quad U_{ij}^* = \frac{U_{ij}}{U_{баз}}; \quad u_{ij}^* = \frac{u_{ij}}{U_{баз}}; \quad I_{Hi}^{**} = \frac{I_{Hi}^*}{I_{баз1}},$$

где $i = 1...4$; $j = 0...5$.

В качестве базисных приняты следующие величины $U_{баз} = U_{II}$;

$$I_{баз1} = \frac{U_{баз}}{\omega_1 L}; \quad I_{баз2} = \frac{U_{баз}}{\omega_2 L_1}.$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC_2} - \left[\frac{R}{2L}\right]^2} = \omega_{01} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}} - \text{круговая частота собственных колеба-}$$

ний резонансного контура на интервале с выключенным транзистором $VT3$ ($L = L_1 + L_k$ – индуктивность резонансного контура; L_1 – индуктивность резонансного дросселя $L1$; L_k – индуктивность рассеивания трансформатора $TV1$); C_2 – емкость конденсатора резонансного контура $C2$;

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{LC_2}} - \text{круговая частота собственных колебаний контура на первом}$$

интервале без учета потерь с выключенным транзистором $VT3$;

$$Q_1 = \frac{\omega_{01} L}{R} - \text{добротность силового контура на первом интервале работы с}$$

выключенным транзистором $VT3$;

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_2} - \left[\frac{R}{2L_1} \right]^2} = \omega_{02} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}} - \text{круговая частота собственных колеба-}$$

ний резонансного контура на интервале с включенным транзистором $VT3$;

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_2}} - \text{круговая частота собственных колебаний контура на первом}$$

интервале без учета потерь с выключенным транзистором $VT3$;

$$Q_2 = \frac{\omega_{02} L_1}{R} - \text{добротность силового контура на первом интервале работы с}$$

выключенным транзистором $VT3$.

При этом следует учитывать следующие зависимости:

- $\theta_1 = \omega_1 t$ и $\theta_2 = \omega_2 t$ – циклическая частота собственных колебаний контура с выключенным и с включенным транзистором $VT3$;

- $\vartheta'_j = \omega_1 t_j$ и $\vartheta''_j = \omega_2 t_j$ – угловые длительности j -го интервала работы контура с выключенным и включенным транзистором $VT3$;

Соотношение добротностей контура с выключенным и включенным транзистором $VT3$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} = \sqrt{\frac{L_k}{L_1} + 1}$$

Соотношение собственных частот колебания контура с выключенным и включенным транзистором $VT3$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}$$

Соотношение базисных токов контура с выключенным и включенным транзистором $VT3$

$$\frac{I_{\delta a31}}{I_{\delta a32}} = \frac{Q_2^2 \sqrt{4Q_2^2 - 1}}{Q_1^2 \sqrt{4Q_1^2 - 1}}$$

Учитывая изложенное, представлены выражения в относительных единицах для 1-го режима работы КРП, когда включены транзисторы $VT1$, $VT4$.

$$\left. \begin{aligned} i_{11}^* &= (1 + U_{10}^* - U_H^*) e^{\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \sin \theta}, \\ u_{11}^* &= (1 - U_H^* + U_{10}^*) \left[1 - \frac{2Q_1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} e^{\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \sin(\theta_1 - \xi_1)} \right] - U_{10}^* \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\begin{aligned}
 U_{11}^* &= (1 + U_{10}^* - U_H^*) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}} \right) - U_{10}^* \\
 i_{12}^* &= (U_{11}^* - U_H^* - 1) e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \theta_1} \sin \theta_1, \\
 u_{12}^* &= (U_{11}^* - U_H^* - 1) \left(1 - \frac{2Q_1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \sin(\theta_1 + \xi_1) e^{\frac{1}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}} \theta_1} \right) - U_{11}^*, \\
 \xi_1 &= \arcsin \frac{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}{2Q_1}, \quad U_{12}^* = (U_{11}^* - U_H^* - 1) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_2^2 - 1}}} \right) - U_{11}^*, \\
 I_{H1}^{**} &= \frac{(U_{11}^* + U_{10}^*)}{2\pi} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_1^2 - 1}}} \right),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где U_{01}^* – относительное начальное напряжение конденсатора $C2$ на первом интервале полупериода работы преобразователя; u_{11}^* – относительное мгновенное напряжение конденсатора $C2$; U_{11}^* – относительное начальное напряжение конденсатора $C2$; U_{12}^* – относительное начальное напряжение на втором интервале полупериода работы преобразователя; U_H^* – относительное напряжение конденсатора C_H ; i_{11}^* – относительный мгновенный ток резонансного контура на втором интервале полупериода работы преобразователя; i_{12}^* – относительный мгновенный ток резонансного контура на втором интервале полупериода работы преобразователя;

I_{H1}^{**} – средний ток заряда конденсатора C_H для рассматриваемого режима работы КРП.

Аналогично были получены выражения для других режимов работы КРП. Предлагается следующий алгоритм работы с математической моделью:

1. Задаться параметрами контура Q_1 (принимается $Q_1 = 5 \dots 10$) и L_k/L_1 (принимается $L_k/L_1 = 0,25$);

2. Задаться углом управления шунтирующим транзистором ($VT5$) β ($\beta = 0 \dots 2\pi$) и напряжением нагрузки $U_H^* = 0 \dots 1$;

3. Определить Q_2 (из условия $\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{L_k}{L_1} + 1}$);

4. Исходя из угла управления β и напряжения нагрузки U_n^* , определить режим работы преобразователя:

- импульсы управления отсутствуют, $0 < U_n^* < 1$ – режим 1;
- $\beta < \pi$, $0 < U_n^* < 1$ – режим 2;
- $\pi < \beta < 2\pi$, $0 < U_n^* < \frac{1}{2}$ – режим 3;
- $\pi < \beta < 2\pi$, $\frac{1}{2} < U_n^* < 1$ – режим 4.

5. Найти начальное напряжение конденсатора $C2$ для соответствующего режима работы преобразователя;

6. Определить угловую длительность $\theta'_1 = \beta$ первого интервала работы (для режима 2) или $\theta'_2 = \beta - \pi$ второго интервала работы (для режима 3 и 4);

7. Полученные значения подставить в соответствующие уравнения согласно определённому режиму;

8. При необходимости выполнить переход от относительных единиц к абсолютным.

На базе полученной математической модели выявлены основные закономерности процессов, происходящих в преобразователе, выполнены расчёты, которые позволили установить количественные взаимосвязи между параметрами элементов силовых цепей.

Результатами моделирования являются кривые изменения напряжения на конденсаторе $C2$, ток диагонали схемы, ток нагрузки, ток транзистора и среднее значение приведенного тока C_n (I_n^{**}) в различных режимах работы схемы для одного полупериода работы преобразователя.

Далее приведены полученные в результате моделирования кривые изменения напряжения на конденсаторе $C2$ - $U_c = f(\omega t)$, ток диагонали схемы - $I = f(\omega t)$ и среднее значение приведенного тока нагрузки $I_n^{/**}$ в различных режимах работы схемы для одного полупериода работы преобразователя.

Результаты моделирования режима 1, характерной особенностью которого является отсутствие импульсов управления транзистором $VT5$, при напряжении нагрузки $U_n^* = 0,7$ приведены на рис. 2. Среднее значение приведенного тока нагрузки $I_{n1}^{/**} = 1$.

Результаты моделирования режима 2, характерной особенностью которого является подача импульса управления транзистором $VT5$ на интервале проводимости транзисторов диагонали, при $U_n^* = 0,7$, $\beta = \frac{2\pi}{3}$ приведены на рис. 3. Среднее значение приведенного тока нагрузки равно $I_{n2}^{/**} = 0,33$.

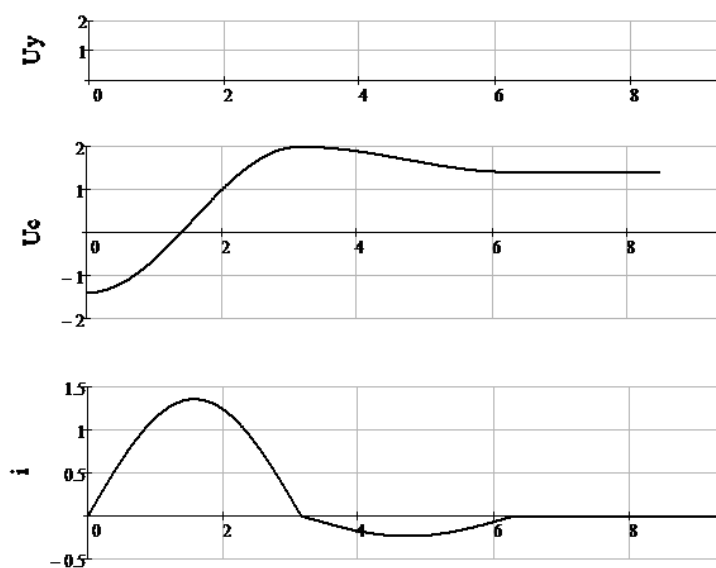


Рис. 2. Результаты моделирования режима 1

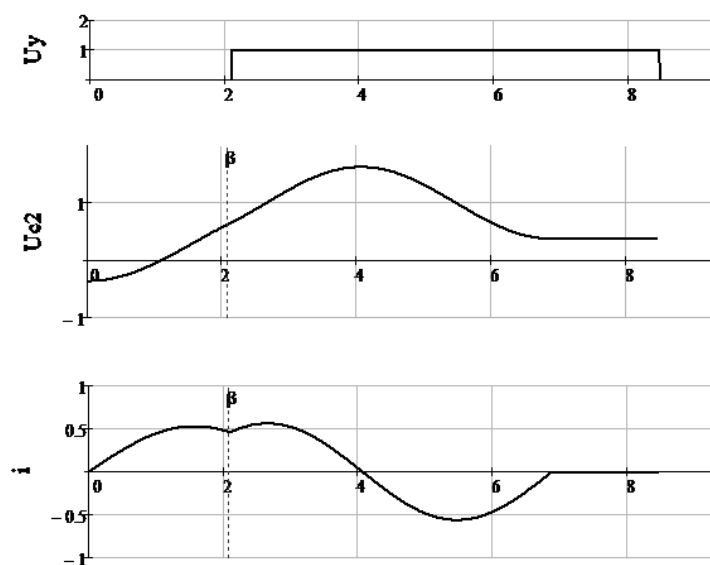


Рис. 3. Результаты моделирования режима 2

Результаты моделирования режима 3, характерной особенностью которого является подача импульса управления транзистором $VT5$ на интервале проводимости обратных диодов $VD1$ и $VD4$, при $U_H^* = 0,3$, $\beta = \frac{4\pi}{3}$ приведены на рис. 4. Среднее значение приведенного тока нагрузки $I_{H3}^{//*} = 0,63$.

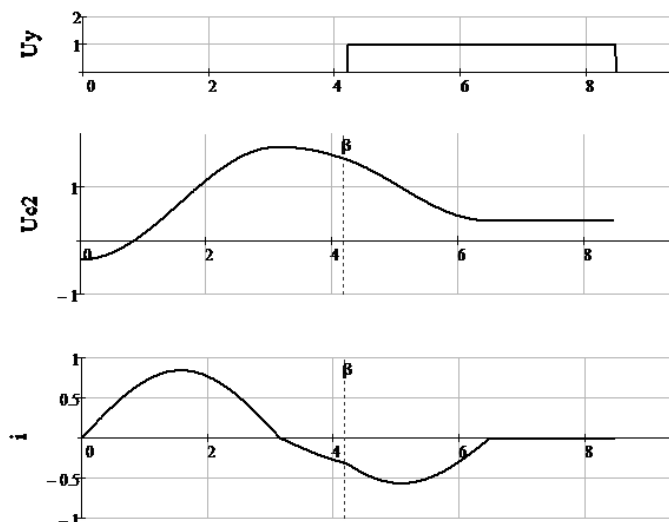


Рис. 4. Результаты моделирования режима 3

Результаты моделирования режима 4, характерной особенностью которого является наличие бестоковой паузы между интервалом проводимости транзисторов диагонали и интервалом проводимости обратных диодов $VD1$ и $VD4$, при $U_H^* = 0,7$, $\beta = \frac{4\pi}{3}$ приведены на рис. 5. Среднее значение приведенного тока нагрузки $I_{H5}^{//*} = 0,5$.

Перебирая напряжение нагрузки U_H^* с определённой дискретизацией, при некоторых фиксированных углах управления β транзистором $VT5$, можно получить семейство внешних характеристик (зависимость напряжения нагрузки от среднего значения приведенного тока нагрузки при различных углах управления).

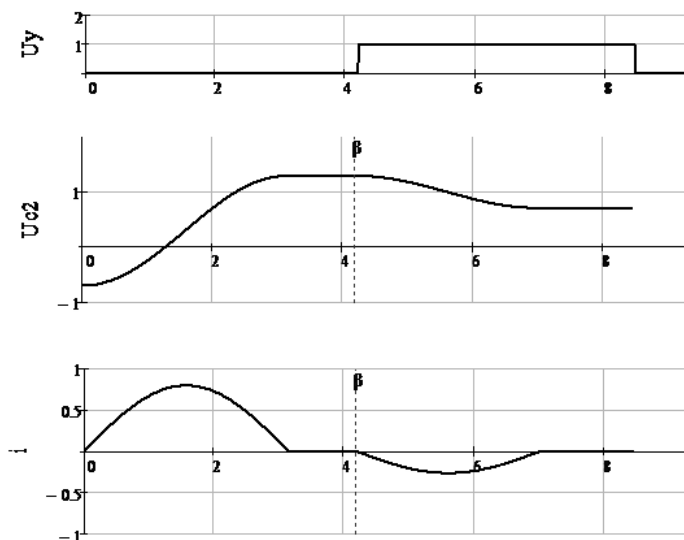
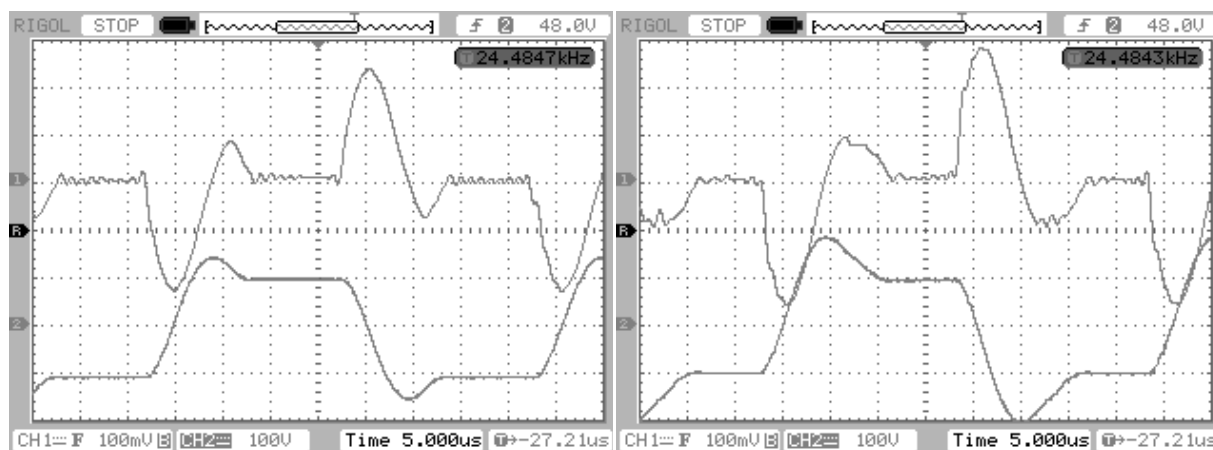


Рис. 5. Результаты моделирования режима 4

Проведено экспериментальное исследование КРП. На рис.6 даны осциллограммы электромагнитных процессов в КРП.



а)

б)

Рис. 6. Осциллограммы тока диагонали КРП (вверху) и напряжения на конденсаторе С2 (внизу):

а - при $\beta = 0$ и *б* - при $\beta > 0$

Наблюдается совпадение теоретических и экспериментальных результатов в пределах 10%.

Выводы

1. Разработанная математическая модель зарядного преобразователя позволяет определить основные закономерности протекания и дать количественную оценку электромагнитных процессов в зарядном устройстве, выполненном на основе КРП с шунтирующим транзистором, при различных напряжениях нагрузки.

2. Полученная математическая модель даёт возможность определить параметры компонентов схемы (собственную частоту резонансного контура, напряжение питания и т.д.) КРП из условия получения требуемых режимов работы.

3. Математическое описание универсально, поскольку выполнено в относительных единицах, переход к абсолютным единицам производится умножением относительных единиц на соответствующие базисные величины.

4. Наблюдается достаточное совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

Библиографический список

1. **Басовский, В.Ф.** Устройства электропитания электронной аппаратуры / В.Ф. Басовский, Н.А. Баско, Н.А. Брик. – Киев: Техника, 1980. – 239 с.
2. **Кириенко, В.П.** Электропитание радиолокационных станций / В.П. Кириенко, В.Ф. Стрелков, Л.В. Тетенькин // Сб. докл. Всерос. Конф. по средствам электропитания. – СПб., 2010. – С. 21-27.

3. **Антипов, Н.А.** Дизель-электрический агрегат в гибридной системе с возобновляемыми источниками энергии / Н.А. Антипов, В.Н. Белов, А.Б. Михайлин. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.powercite.ru/indexa/php>.
4. **Долов, В.Н.** Электропитание клистрона передающего модуля РЛС / В.Н. Долов [и др.] // Состояние и перспективы развития электротехнических средств межвидового назначения : материалы научно–практич. конф. – М. : 3 ЦНИИ, 2013. – С. 56-60.
5. **Полищук, А.А.** Высокоэффективные источники вторичного электропитания высокого напряжения для радиопередающих устройств СВЧ // Силовая электроника. – 2004. – №2. С. 66-70.
6. Пат. на изобретение № 2385526, РФ, МПК Н 02 М 7/ 53846. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь / В.П. Кириенко, В.Ф. Стрелков. Опубл. 27.03.2010. Бюл. № 9.
7. Пат. на изобретение № 2417510, РФ, МПК Н 02 М 7/ 53846. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь / В.Ф. Стрелков, В.П. Кириенко, В.В. Ваняев. Опубл. 27.04.2011. Бюл. № 12.
8. Пат. на изобретение № 2418355, РФ, МПК Н 02 М 7/ 53846. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь / В.Ф. Стрелков, В.П. Кириенко, В.В. Ваняев. Опубл. 10.05.2011. Бюл. № 13.
9. Пат. на изобретение № 2418355, РФ, МПК Н 02 М 3/ 335, Н 02 М 7/ 53846. Стабилизированный квазирезонансный преобразователь / В.В. Ваняев, В.Ф. Стрелков, В.П. Кириенко. Опубл. 10.04.2014. Бюл. № 10.

УДК 621.316.722.3

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев

**СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ УГЛА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ
НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Волжский государственный университет водного транспорта

Рассмотрены способы коррекции угла управления в фазосмещающих устройствах при нестабильности частоты питающего напряжения. Представлен способ коррекции угла управления с использованием блока памяти, содержащий необходимый код в зависимости от частоты входного сигнала и обеспечивающий практически плавное изменение угла управления при нестабильности частоты сети.

In the article methods of correction of the phase angle control in phase-shifting devices with instability of frequency voltage are considered. A method for correcting the phase angle control using a memory block is containing the necessary code, which depending on the frequency of the input signal and providing a virtually smooth change in the phase angle control when the frequency of system electrical power is unstable.

Ключевые слова: фазосмещающее устройство, коррекция угла управления, блок памяти, нестабильность частоты питающей сети.

Key words: phase-shifting device, correction of the phase angle control, block of memory, instability frequency of system electrical power.

Системы управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии представляют собой сложные устройства для обработки информации и обладают широким разнообразием в зависимости от типа преобразователя. При этом системы управления должны выполнять две основные функции: определение моментов времени для коммутации соответствующих ветвей полупроводникового преобразователя и формирование управляющих сигналов определенной длительности и формы [1]. Фазосмещающие устройства (ФСУ), входящие в состав систем управления полупроводниковыми преобразователями, нашли применение в системах питания различных судовых потребителей. К такого рода потребителям можно отнести потребителей общего судового назначения, системы электроснабжения и электропривод судовых механизмов [2].

Основная функция ФСУ сводится к формированию угла управления α в зависимости от управляющего сигнала. Наиболее широкое распространение получили ФСУ с «вертикальным» способом управления, при котором момент формирования управляющего импульса определяется равенством двух сигналов: управляющего U_y и опорного $u_{оп}$, а изменение значения управляющего сигнала U_y приводит к изменению угла управления α [3, 4]. При «вертикальном» типе используются косинусоидальные и линейные формы опорного напряжения [3].

Косинусоидальная форма напряжения может быть сформирована из сетевого напряжения. При таком способе формирования опорного сигнала гармонические искажения сетевого напряжения и внешние помехи оказывают негативное влияние на работу ФСУ, что приводит к возникновению погрешностей формирования угла управления. При значительных искажениях питающей сети используется опорное напряжение в виде линейно-изменяющегося напряжения.

Достоинством цифровых ФСУ являются отсутствие временных и температурных дрейфов, технологического разброса параметров и др. [5]. В цифровых ФСУ используется линейная форма опорного сигнала $u_{оп}$, которая представлена в виде кода и принимает 2^n значений [3].

В судовых системах электроснабжения происходят периодические отклонения частоты питающего напряжения вследствие изменения генерируемой и потребляемой мощности. В результате чего известные ФСУ «вертикального» типа не могут обеспечить нормальное функционирование при изменении частоты напряжения. Работа ФСУ проиллюстрирована на рис. 1. Линейно-возрастающий опорный код $K_{оп}$ и код управления K_y приведены на рис. 1 в виде весового кода. Опорный код формируется счетчиком или сумматором, при этом изменение осуществляется за половину частоты питающего напряжения u . Начало формирования опорного кода соответствует моменту естественной коммутации вентиля полупроводникового преобразователя. Однако при отклонении частоты питающего напряжения u' от номинального u момент равенства опорного кода и кода управления будет соответствовать другому значению мгновенного напряжения u' .

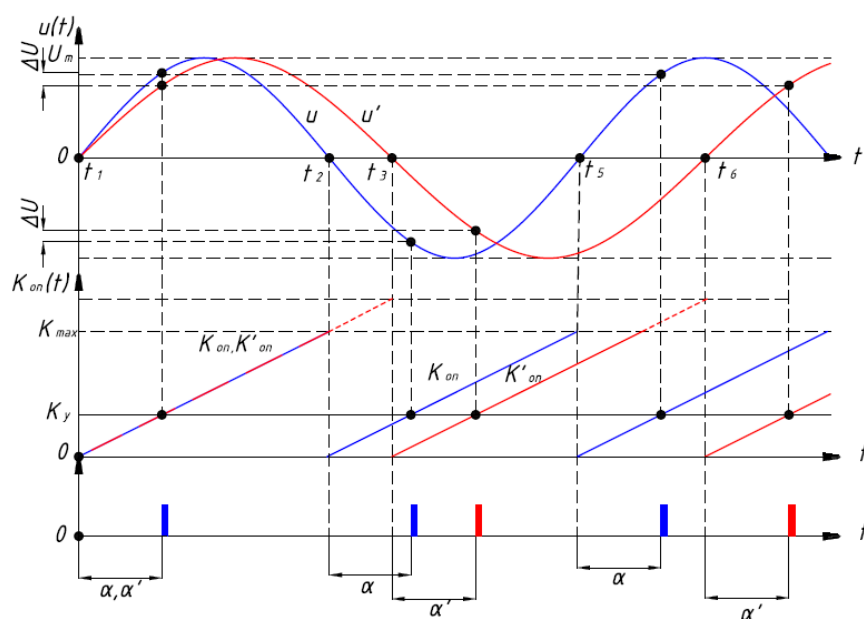


Рис. 1. Эпюры сигналов, иллюстрирующие возникновение погрешности напряжения с выхода преобразователя при изменении частоты напряжения

Для уменьшения погрешности среднего выпрямленного напряжения с выхода полупроводникового выпрямителя используются различные методы коррекции моментов формирования угла управления: коррекция изменением опорного сигнала, а также изменением сигнала управления.

Коррекция опорного кода может достигаться изменением частоты импульсов, поступающих на счетчик в функции частоты питающего напряжения. Такой способ приводит к изменению наклона линейно-изменяющегося кода с выхода генератора опорного напряжения, что приводит к изменению динамических характеристик в функции отклонения частоты напряжения сети [6]. Один из вариантов построения ФСУ подобного типа включает в себя преобразователь напряжения в частоту импульсов (ПНЧ).

Работа ФСУ с коррекцией опорного кода проиллюстрирована на рис. 2. Начало формирования опорного кода осуществляется в моменты времени t_1-t_6 . Данные моменты фиксируются синхронизирующим устройством, на вход которого подается сетевое напряжение. При отклонении частоты питающего напряжения u' от номинального u наклон линейно-возрастающего опорного кода $K_{оп}$ изменяется в соответствии с периодом питающего напряжения u . Наклон сигнала $K'_{оп}$ зависит от частоты импульсов, поступающих на счетчик ФСУ. Моменты равенства опорного кода $K_{оп}$ и кода управления K_y будут соответствовать прежнему углу управления α , которому соответствует мгновенное значение U_α питающего напряжения u .

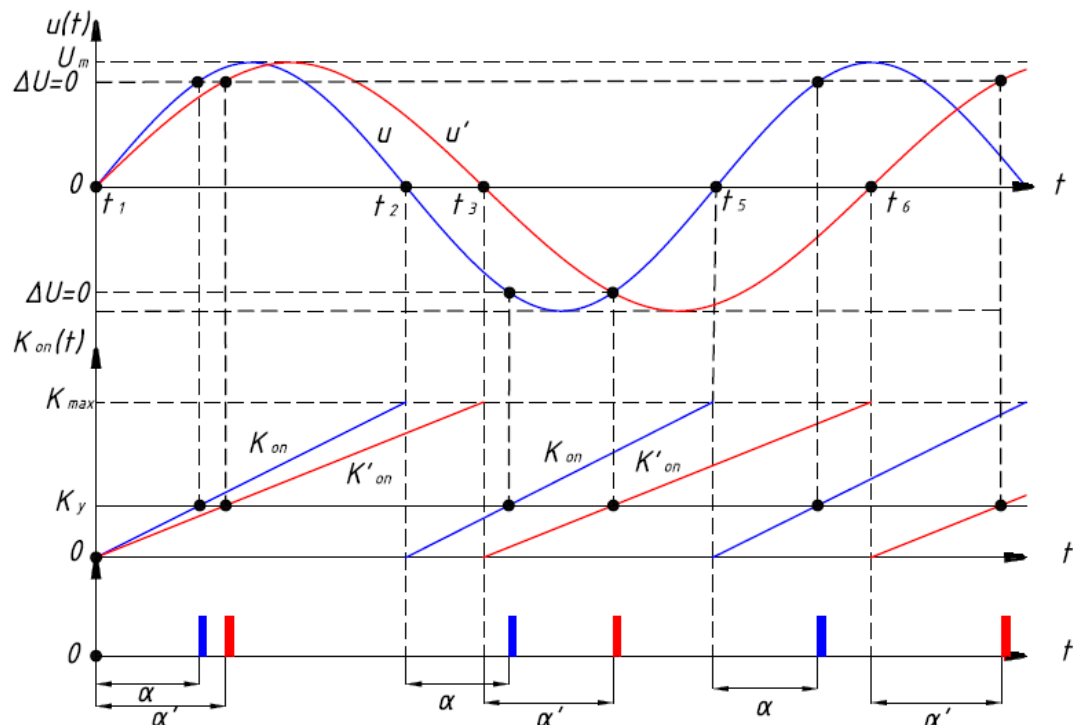


Рис. 2. Эпюры сигналов, иллюстрирующие корректировку угла управления при изменении наклона опорного кода

При коррекции угла управления способом изменения опорного кода метрологические характеристики ФСУ во многом определяются точностью работы ПНЧ. Временной и температурный дрейф и степень восприимчивости к помехам цифрового ФСУ практически полностью определяются дрейфовыми характеристиками и способом преобразования информации ПНЧ. Точность формирования угла управления в данных ФСУ также определяется погрешностью квантования периода входного сигнала, в результате изменение заданного угла управления происходит неравномерно при нестабильности частоты входного напряжения.

Вторым способом коррекции угла управления является коррекция сигнала управления в зависимости от частоты питающего напряжения. При таком способе коррекции наклон опорного кода при изменении частоты входного сигнала остается постоянным. А коррекция управляющего кода происходит непосредственно в ФСУ [1, 7].

Работа ФСУ с коррекцией кода управления проиллюстрирована на рис. 3. Начало формирования опорного кода осуществляется в моменты времени t_1-t_6 при переходе питающего напряжения через ноль. При отклонении частоты питающего напряжения u' от номинального u наклон линейно-возрастающего опорного кода $K_{оп}$ остается неизменным, а код управления K_y изменяется в соответствии с изменением периода питающего напряжения. В этом случае равенство опорного кода $K'_{оп}$ и управляющего кода K'_y будет соответствовать углу управления α , которому соответствует мгновенное значение U_α питающего напряжения u .

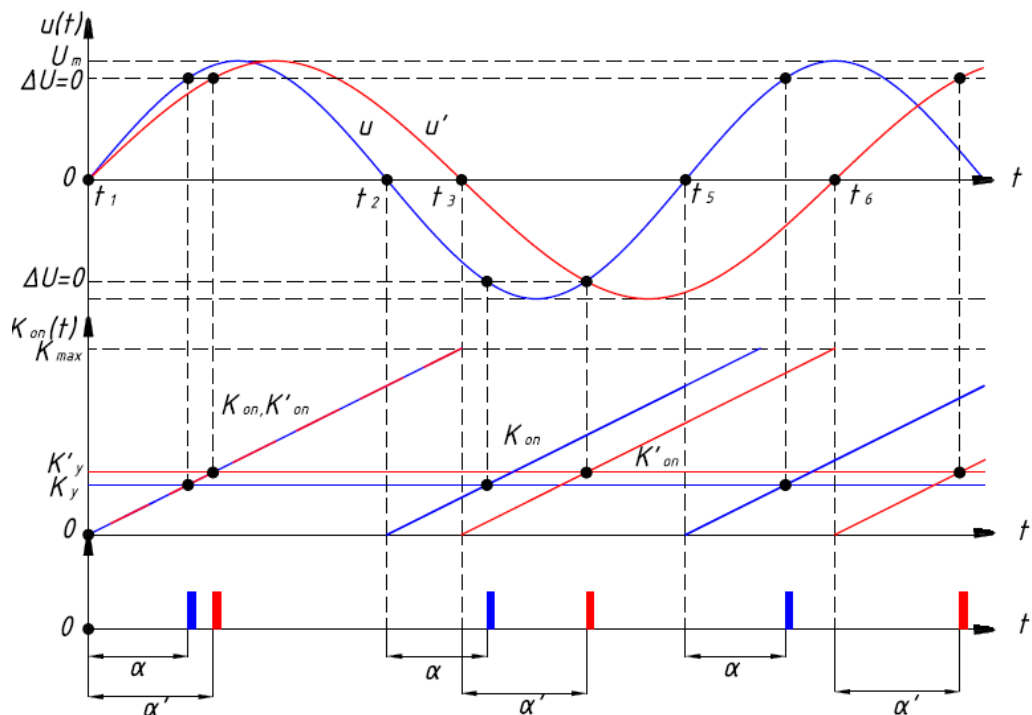


Рис. 3. Эпюры сигналов, иллюстрирующие корректировку угла управления при изменении управляющего кода

Непосредственную коррекцию управляющего кода в ФСУ может выполнять блок памяти, формирующий код в зависимости от частоты питающей сети и необходимого угла управления. По адресам блока памяти записываются коды $K_{зн}^{(i,j)}$ задающего напряжения, соответствующие частоте $f_c^{(i)}$ питающего напряжения и заданному углу $\alpha^{(j)}$ управления:

$$K_{зн}^{(i,j)} = K_{fc}^{(i)} / K_{\alpha}^{(j)},$$

где $K_{fc}^{(i)}$ – i -й адрес по первой координате, соответствующий коду частоты питающего напряжения; i – номер адреса по первой координате $i = 1, 2, 3 \dots n$, при этом $f_c^{(1)}$ соответствует $f_c = f_{ном} + \Delta f$, а $f_c^{(n)}$ – $f_c = f_{ном} - \Delta f$; $K_{\alpha}^{(j)}$ – j -й адрес по второй координате $K_{\alpha}^{(j)} = \pi / \alpha^{(j)} = 180^\circ / \alpha^{(j)}$; j – номер адреса по второй координате $j = 1, 2, 3 \dots m$, при этом $K_{\alpha}^{(1)}$ соответствует $\alpha^{(1)} = 180^\circ / m$, а $K_{\alpha}^{(m)}$ – $\alpha^{(m)} = 180^\circ$.

Таким образом, применение фазосмещающих устройств, в состав которых входит блок памяти с записанным кодом в функции от угла управления и частоты входного сигнала, обеспечивает практически плавное изменение угла управления и высокую его стабильность в условиях нестабильности частоты питающей сети.

Библиографический список

1. **Сугаков, В.Г.** Применение фазосмещающего устройства в условиях нестабильности частоты питающего напряжения / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, А.И. Мешков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст. — Н.Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. — С. 168–172.
2. **Сугаков, В.Г.** Цифровое фазосмещающее устройство и его области применения на объектах водного транспорта / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст. — Н.Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2017. — С. 99–103.
3. **Горбачев, Г.Н.** Промышленная электроника: учебник для вузов / Г.Н. Горбачев, Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 279-295.
4. **Руденко, В.С.** Основы преобразовательной техники: учебник для вузов / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – М.: Высш. шк., 1980. – С. 396-417.
5. **Иванов, А.Г.** Системы управления полупроводниковыми преобразователями / А.Г. Иванов, Г.А. Белов, А.Г. Сергеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 56-68.
6. Пат. 2373624 Российская Федерация, МПК H02M 1/08 Фазосдвигающее устройство / Л.И. Цыгович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – №2008142656/09; заявл. 27.10.2008; опубл. 20.11.2009. Бюл. № 32. – 15 с.
7. Пат. 2612055 Российская Федерация, МПК G01R 25/00 Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов. – 2015155112; заявл. 22.12.2015; опубл. 02.03.2017. Бюл. № 7. – 6 с.

УДК 621.311

В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК
И ИНТЕРГАРМОНИК**

Юго-Западный государственный университет

Статья посвящена вопросам анализа спектрального состава токов в электрических сетях. Показано, что в настоящее время происходит возрастание токов высших гармоник, а также интергармонических и субгармонических составляющих, рассмотрены недостатки преобразования Фурье и его модификаций, применяемых для анализа спектрального состава токов. Предложено применение вейвлет - преобразования для нахождения токов высших гармоник, интергармонических и субгармонических составляющих.

The article is devoted to the analysis of the currents spectral composition in the electrical networks. It is shown that at present time there is an increase in the currents of the higher harmonics, as well as interharmonic and subharmonic components; the disadvantages of the Fourier transform and its modifications used to analyze the spectral composition of the currents are considered. The application of the wavelet transform is proposed for finding currents of higher harmonics, interharmonic and subharmonic components.

Ключевые слова: высшие гармоники, интергармонические составляющие, преобразование Фурье, вейвлеты, алгоритм, электрические сети.

Key words: higher harmonics, interharmonic components, Fourier transform, wavelets, algorithm, electrical networks.

В настоящее время для электрических сетей характерно постоянное увеличение содержания среди потребителей нелинейных электроприемников, причем данный процесс происходит как для промышленной нагрузки, так и для других ее видов. При анализе работы систем электроснабжения следует учитывать непрерывное возрастание объемов применения оборудования с вентильными выпрямителями и инверторами, различными встроенными импульсными источниками питания с широтноимпульсной модуляцией, силовыми однофазными и трехфазными источниками бесперебойного питания [1].

Также в ходе современных исследований режимов работы электрических сетей с напряжением 0,38/0,22 кВ [2] установлено, что для коммунально-бытовой нагрузки также становится все более характерной значительная несинусоидальность сетевого напряжения, что обусловлено использованием импульсных блоков питания в различных бытовых электроприборах.

Появление токов высших гармоник приводит к различным негативным последствиям, например, возникновению дополнительных потерь в элементах электрических сетей и их повышенному нагреву. Поэтому контроль токов высших гармоник – актуальная задача. Но при этом следует учитывать, что нагруз-

ки в электрических сетях постоянно изменяются, что в итоге приводит к нестационарности и непериодичности обрабатываемых различными средствами измерения токовых сигналов, содержащих, кроме высших гармонических составляющих, также интергармонические и субгармонические составляющие [3].

В настоящее время обработка токовых сигналов при контроле работы электрических сетей выполняется с применением различных цифровых методов, основанных на известном дискретном преобразовании Фурье [4, 5]. Для его работы используются дискретные сигналы, определяемые в дискретные моменты времени и представляемые последовательностями значений. Эти дискретные сигналы формируются при осуществлении электрических измерений выполнением преобразования от аналоговой формы к цифровой.

Однако алгоритмы Фурье имеют несколько источников методических погрешностей, которые приводят к снижению точности результатов гармонического анализа и их качественному искажению. Многие трудности, возникающие при анализе сигналов с помощью преобразований Фурье, обусловлены тем, что реальные сигналы бывает трудно с достаточной точностью описать при помощи взвешенной суммы синусоид различных частот. Также следует отметить, что общим недостатком всех видов преобразования Фурье является невозможность определения интергармоник.

Альтернативой преобразованиям Фурье является математический аппарат преобразования сложных сигналов – вейвлет - преобразование (wavelet transform) – достаточно новое и мощное средство для анализа и обработки сигналов. Это частотно-временное преобразование, которое позволяет осуществить локализацию сигнала по частоте и времени.

Понятие вейвлет (wavelet) в переводе с английского языка означает короткая или маленькая волна. Вейвлеты представляют собой некоторый набор функций, основанный на использовании выражения исследуемого сигнала $s(t)$ в следующем виде [5]:

$$s(t) = \sum_{i=1}^k C_i \varphi_i(t), \quad (1)$$

где C_i – коэффициенты; $\varphi_i(t)$ – базисные функции.

Это дает возможность представления произвольных исследуемых сигналов на основе применения рядов (1) с различными базисными функциями. В качестве базисных функций вейвлетов могут использоваться разнообразные функции, включая близко или отдаленно похожие на модулированные импульсами синусоиды, функции, имеющие скачки уровня и т.д. Это обеспечивает возможность исследования самых разнообразных сигналов.

Основное достоинство вейвлет - преобразования в том, что оно позволит обработать сигнал любой сложности. Скользящий спектр Фурье, напротив, не различит локальных и глобальных свойств сигнала, не позволит выделить или исключить характерные свойства нестационарных сигналов.

Для проведения анализа сигналов тока удобно использовать базисный

вейвлет типа Морле, дающий наименьшую погрешность при исследовании сигналов тока и напряжения [6]. Результатом вейвлет - анализа будет некоторая функция $W(x, s)$, которая зависит уже от двух переменных: от времени и от частоты (обратно пропорционально). Для каждой пары x и s алгоритм вычисления вейвлет преобразования следующий:

1. Функция вейвлет растягивается в s раз по горизонтали и в $1/s$ раз по вертикали;
2. Далее вейвлет сдвигается в точку x . Полученный вейвлет обозначается $\psi(x, s)$;
3. Производится усреднение в окрестности точки s при помощи $\psi(x, s)$.

Работа алгоритмов вейвлет - преобразования может быть оптимизирована следующим образом. Известно, что все гармоники с номером, кратным 3 (3, 6, 9 и т.д.), сдвинуты относительно друг друга на угол 2π , т.е. совпадают по фазе. Поэтому они могут существовать в электрической сети только тогда, когда есть для них пути протекания.

В этом случае использование вейвлет - преобразования может производиться по сокращенному алгоритму, представленному на рис.1.

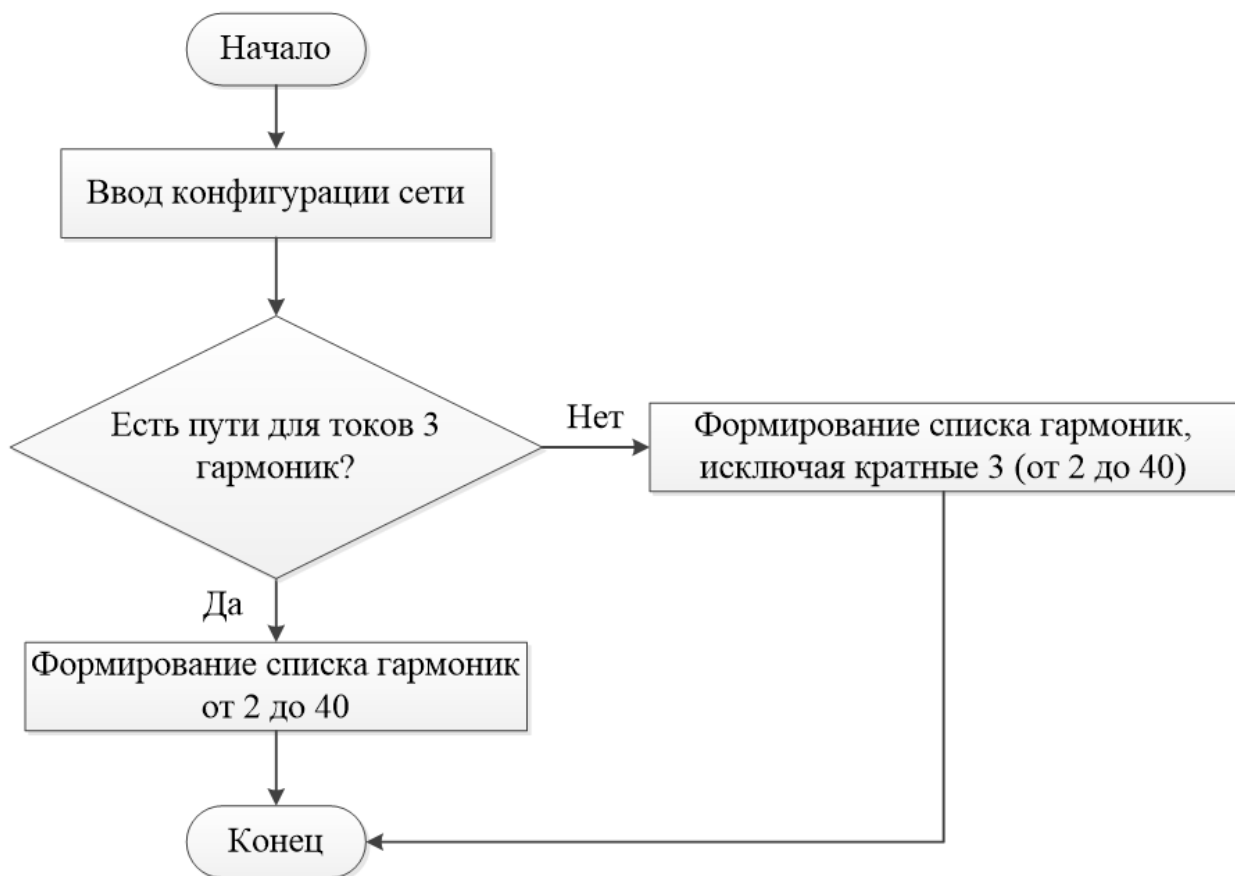


Рис. 1. Алгоритм формирования списка содержания высших гармоник токов, напряжения и интергармоник

На этапе получения начальных данных производится анализ электрической сети, в которой будет осуществляться анализ содержания высших гармоник токов, напряжения и интергармоник. Если нет путей протекания токов гармоник, кратных трем, то формируется сокращенный ряд гармоник, по которым производится анализ.

Таким образом, приведенный алгоритм подготовки применения вейвлет-преобразования учитывает конфигурацию рассматриваемой электрической сети и возможность протекания в ней токов высших гармоник, кратных трем. Это дает возможность сократить объем необходимых вычислений, что позволяет реализовать вейвлет-преобразование на вычислительной базе, имеющей сравнительно небольшие системные ресурсы, а значит и невысокую стоимость.

Библиографический список

1. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
2. Сапунов, М.В. Вопросы качества электроэнергии // Новости электротехники. – 2001. — № 4. – С. 8–10.
3. Жежеленко, И.В. Источники интергармоник в системах электроснабжения и методы их расчёта / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко // Промэлектро. – 2003. – №3. – С. 3–18.
4. Рабинер, Р. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Р. Рабинер, Б. Голд. – М.: Мир, 1978. – 833 с.
5. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2005. – 604 с.
6. Волошко, А.В. К вопросу мониторинга качества электрической энергии / А.В. Волошко, А.Л. Харчук // Изв. Тоского политехнического ун-та. – 2015. – Т. 326. – № 3 – С. 76–85.

УДК 621.314

Д.В. Калинин¹, А.В. Назаров¹, Р.Р. Османов¹, В.Г. Титов²

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ПОЛИГОННОМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассматриваются возможные пути улучшения электромагнитной обстановки для КВЧ радиоинтерферометрического комплекса, питание которого осуществляется от импульсного источника (ИИП). В качестве основного метода, позволяющего уменьшить уровень шумов на выходе источника питания (ИП), предложено использовать помехоподавляющий фильтр. Приведены упрощенная методика расчета фильтра и рекомендации по конструированию помехоподавляющих фильтров.

In article possible ways of improvement of an electromagnetic situation for the radiointerferometr complex fed by the pulse power supply (PPS) are considered. As the main method allowing to reduce the level of noise at the power supply exit it is offered to use the noise suppressing filter. The simplified method of calculation of the filter is given, practical measures on designing of noise suppressing filters are proposed.

Ключевые слова: импульсный источник питания, электромагнитные помехи, электромагнитная совместимость, фильтры.

Key words: pulse power supply, electromagnetic hindrances, electromagnetic compatibility, filters.

В последние три десятилетия импульсные источники вторичного электропитания (ИВЭП), благодаря своим массогабаритным показателям, значениям КПД и малой цене, успешно вытесняют во всех областях техники линейные источники питания (ЛИП). Однако, при всех своих неоспоримых достоинствах, импульсные источники питания (ИИП) являются источниками интенсивных электромагнитных помех (ЭМП), негативно влияющих на работу приборов.

Так, применение ИИП в разрабатываемом в НИИИС им. Ю.Е. Седакова [1] полигонном радиоинтерферометрическом комплексе (РИК) приводит к резкому увеличению уровня собственных шумов прибора и, как следствие, к увеличению погрешности обработки результатов измерений [2], что в случае высокоточных измерений является крайне нежелательным. Для достижения требуемой точности измерений, проводимых с помощью РИК, необходимо обеспечить величину пульсаций выходного напряжения ИП не более 1-2 мВ. Поэтому обеспечение электромагнитной совместимости уменьшением электромагнитных помех, создаваемых ИИП, является крайне актуальной задачей.

Существует три основных метода, позволяющих уменьшить уровень электромагнитных помех на выходе ИП:

- применение входных и выходных помехоподавляющих фильтров ИП;
- уменьшение собственных шумов ИП;
- экранирование самого ИП.

Из-за того, что в качестве ИВЭП в разрабатываемом приборе используются готовые импульсные модули питания в экранированных корпусах, единственным путем уменьшения влияния высокочастотных пульсаций на работу РИК является фильтрация радиопомех источника.

Помехоподавляющие фильтры представляют собой каскадное соединение нескольких Г-образных или Т-образных звеньев (в зависимости от требуемого уровня ослабления помех). Структура фильтра определяется во многом внутренним сопротивлением источника помех, сопротивлением сети и видом помех.

На практике чаще применяют наиболее простой и достаточно эффективный Г-образный LC фильтр.

Для решения задачи уменьшения влияния радиопомех ИИП на РИК представим ИП в виде обычного генератора с бесконечно большим количеством спектральных составляющих и внутренним сопротивлением Z_u , к которому подключено сопротивление линии передачи Z_l .

В такой схеме для получения наименьшего напряжения радиопомех в линии необходимо иметь как можно большее высокочастотное сопротивление Z_u , что достигается включением индуктивности в каждый отходящий от источника радиопомех провод. Также для снижения радиопомех уменьшают Z_l шунтированием высокочастотного сопротивления каждого провода конденсатором на корпус.

Общая эквивалентная схема ИП и помехоподавляющего фильтра представлена на рис. 1.

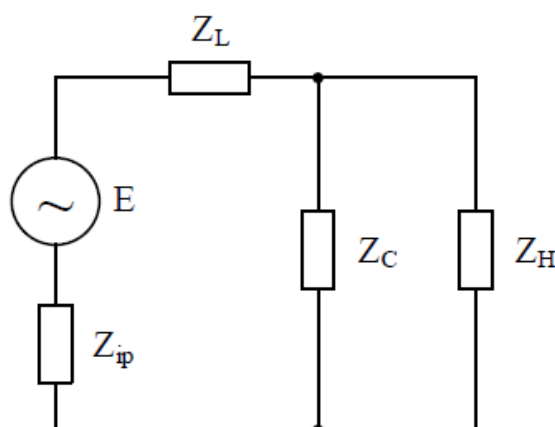


Рис. 1. Эквивалентная схема фильтра:

Z_{ip} – внутреннее сопротивление источника помех; Z_L , Z_C , Z_H – сопротивления дросселя, конденсатора и нагрузки

Рассчитаем коэффициент ослабления помех K_{oc} как отношение напряжений помех U_H при наличии и отсутствии помехоподавляющего фильтра [3]:

$$K_{oc} = \frac{Z_H}{Z_{ip} + Z_H} \cdot \frac{Z_{ip} + Z_L + \frac{Z_H \cdot Z_C}{Z_H + Z_C}}{\frac{Z_H \cdot Z_C}{Z_H + Z_C}}. \quad (1)$$

Если допустить, что сопротивления источника помех Z_{ip} и конденсатора Z_C малы, а сопротивление Z_H велико, то в соотношении (1) $Z_H / (Z_{ip} + Z_H) \approx 1$,

$$\frac{Z_{ip} + Z_L + \frac{Z_H \cdot Z_C}{Z_H + Z_C}}{\frac{Z_H \cdot Z_C}{Z_H + Z_C}} = \frac{Z_L}{Z_C}.$$

В итоге получаем

$$K_{oc} = \frac{Z_L}{Z_C}. \quad (2)$$

Соотношение (2) позволяет вычислить значения L_ϕ и C_ϕ помехоподавляющего фильтра исходя из требуемого значения K_{oc} . Из формулы (2) следует, что для получения заданного K_{oc} можно выбирать различные соотношения между величинами L_ϕ и C_ϕ .

Следует также отметить, что для подавления помех, генерируемых ИИП, конденсаторы необходимо устанавливать максимально ближе к источнику. Для снижения индуктивного влияния линий питания длины печатных проводников должны быть выбраны минимальными и расположены как можно дальше друг от друга. Для минимизации емкостного влияния проводники в смежных слоях должны размещаться перпендикулярно.

Библиографический список

1. Состояние и перспективы развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов / В.А. Канаков [и др.] // Антенны. – 2016. – Вып. 1 (221). – С.49-54.
2. **Корнев, Н.С.** Проблемные вопросы разработки малошумящего импульсного источника питания для полигонного радиоинтерферометрического комплекса / Н.С. Корнев [и др.] // Материалы XXII Междунар. научно-технич. конф. – Н.Новгород, 2016. – С.214.
3. Подавление помех в цепях электропитания / С.Л. Затулов [и др.]. – М: Александер электрик - источники электропитания, 2015. – С.77.

УДК 621.314

А.С. Плехов¹, Д.Ю. Титов¹, Ю.В. Шевырѐв²**ПАССИВНЫЙ ФИЛЬТР ГАРМОНИК С УПРАВЛЯЕМЫМ РЕАКТОРОМ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»²

Предложена система управления фильтра с настраиваемым реактором. При соответствующем управлении такой фильтр может предотвратить генерацию низших гармоник, в частности, кратных третьей гармонике, в условиях несимметричных режимов сети переменного тока, что невозможно при использовании трёхфазных мостовых схем.

The article proposes a filter control system with a tunable reactor. Such a filter can prevent the generation of lower harmonics, in particular, multiple of the third harmonic, in conditions of asymmetrical AC network modes, which is impossible with the use of three-phase bridge circuits.

Ключевые слова: пассивный фильтр, управляемый реактор, настраиваемый фильтр.
Key words: passive filter, controlled reactor, preset filter.

Известны условия, которые налагают ограничения на структуру и режим работы электроприёмника [1].

Существенными параметрами сети в точке подключения являются:

- номинальное напряжение U_n ;
- длительно допустимое отклонение напряжения U от номинального значения;
- кратковременно допустимое отклонение напряжения U от номинального значения;
- номинальная мощность подключаемых агрегатов;
- переходное реактивное сопротивление короткого замыкания X_n ;
- переходная мощность трёхполюсного короткого замыкания $S'_{кз} = U_n / X_n$;
- эквивалентное активное сопротивление сети в точке подключения как оценочная величина для вычисления потерь.

Сеть в точке подключения предполагается безрезонансной. Она может быть представлена как идеальный источник напряжения и переходное реактивное сопротивление короткого замыкания, через которое источник энергии подключен к сборной шине. Эта шина нагружена в общем случае на параллельно подключенные полупроводниковый преобразователь, асинхронный двигатель и RLC -нагрузку с произвольными параметрами. Поскольку полупроводниковый преобразователь является нелинейной нагрузкой, необходимы меры по обеспечению электромагнитной совместимости перечисленных элементов системы электроснабжения [2]. Это актуально и для малой энергетики, источники пита-

ния которой предполагают использование сборной шины постоянного тока с полупроводниковыми преобразователями на её входе и выходе.

В настоящее время широко применяются эффективные преобразователи на основе активных выпрямителей (активных фильтров гармоник) типа СТАТКОМ. Весьма эффективны многофазные преобразователи – инверторы напряжения, называемые в [3] цепочечными (ЦП). СТАТКОМ по схеме ЦП может быть включен последовательно в каждую фазу сети переменного тока, чтобы обеспечить регулируемый положительный или отрицательный реактанс для регулирования потока мощности. Это можно применять при регулировании потоков мощности в параллельных цепях переменного тока и при симметрировании нагрузки в трехфазной сети. В таких преобразователях исключены проблемы и ограничения, связанные с последовательным соединением полупроводниковых ключей. Конденсаторы в каждой цепи ЦП-СТАТКОМ могут быть заменены аккумуляторами в целях обеспечения компенсации активной мощности в системе переменного тока. Это мероприятие позволит обеспечить поддержание частоты, срезы пиков нагрузки, замену вращающегося резерва и повторное включение объектов энергосистемы после аварийного отключения.

Активные выпрямители, в том числе более дешёвые и надёжные активные компенсационные выпрямители звена постоянного тока мощных электроприводов [4], обеспечивают регулирование потребляемого из сети тока по фазе и амплитуде относительно напряжения на шинах переменного тока. При этом можно независимо регулировать потоки активной и реактивной мощности. Преобразователь напряжения действует как двигатель-генератор, почти не обладающий инерцией. Он может регулировать активную и реактивную мощность практически мгновенно. Кроме того, он, в отличие от вращающегося резерва, не подпитывает ток короткого замыкания.

Путём использования техники ШИМ с высокой частотой коммутации в диапазоне 1-2 кГц может быть обеспечена почти синусоидальная форма выходного напряжения. Однако, системы активных выпрямителей наиболее эффективны для компенсации реактивной мощности. Применение их для снижения гармонических искажений в сети требует повышения частоты коммутации вентилей, усложнения схемы управления, обрабатывающей ошибку по регулируемой переменной, и увеличению времени регулирования, то есть к ограничению точности фильтрации гармоник. Целесообразно изменять динамические свойства узла нагрузки применением режекторных фильтров.

Частотный режекторный фильтр строится на основе использования эффекта резонанса напряжений в цепи, состоящей из последовательно соединённых дросселя L , конденсатора C и активного сопротивления R . Амплитуды напряжения на конденсаторе и дросселе численно равны при условии $X_L = X_C$, которое реализуется при частоте $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - собственной частоте контура. Разность потенциалов на участке, содержащем последовательно соединённые дроссель и конденсатор, $\varphi_L - \varphi_C = 0$. Такое электрическое состояние схемы называется резонансом напряжений. Это избирательный отклик колебательной

системы на периодическое воздействие внешнего генератора с амплитудой U_m и частотой, близкой к собственной частоте.

При $\omega = \omega_0$ зависимость амплитуды тока $I_m(\omega)$ от частоты – амплитудно-частотная характеристика – достигает максимального значения $I_m(\omega) = U_m/R$. В этом случае $U_{Rm} = U_m$, а амплитуды $U_{Lm} = U_{Cm} = QU_m$ в Q раз больше амплитуды напряжения на входе системы. Контур ведёт себя как активное сопротивление.

При частотах, близких к ω_0 , когда можно считать $\omega = \omega_0 \approx 2\omega_0$, резонансная кривая имеет вид

$$I_m(\omega) \cong I_{\omega_0} / \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}.$$

Величина $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ называется расстройкой. Для контура с достаточно высокой добротностью Q даже при малых расстройках ток в контуре значительно меньше максимального. В области низких частот $\omega \ll \omega_0$ имеем

$$I_m(\omega) \cong \frac{\omega}{Q\omega_0} I_{\omega_0}; \quad U_{Cm} = U_m; \quad U_{Lm}, U_{Rm} \ll U_m,$$

то есть контур ведёт себя как конденсатор и генерирует реактивную мощность ёмкостного характера.

В области частот $\omega \gg \omega_0$ ток по-прежнему мал:

$$I_m(\omega) \cong \frac{\omega_0}{Q\omega} I_{\omega_0}; \quad U_{Lm} = U_m; \quad U_{Rm}, U_{Cm} \ll U_m.$$

Здесь контур ведёт себя как катушка индуктивности, уменьшая общий коэффициент мощности в точке подключения.

Таким образом, несмотря на простоту и надёжность конструкции, пассивный фильтр гармоник выполняет свои функции только при $\Delta\omega \rightarrow 0$, то есть, требуется подстройка такого фильтра таким образом, чтобы $\omega_0 \rightarrow \omega$.

Фильтры переменного тока должны быть высокоэффективными, чтобы оптимизировать затраты. Поэтому для фильтрации 5 и 7 канонических гармоник в сетях с шестифазными преобразователями, или 11 и 13, которые преобладают при работе двенадцатифазного преобразователя, целесообразно использовать фильтры с электронным регулированием и тонкой настройкой полосы частот с коэффициентом добротности $Q = 150$, что обеспечивает малые потери.

Ранее фильтры переменного тока настраивались с использованием переключаемых батарей конденсаторов малой ёмкости. Это позволяло решать задачу поддержания настройки фильтров при колебаниях их параметров во времени и при изменениях частоты. Эта проблема была решена [3] применением непрерывно настраиваемого реактора, управляемого постоянным током, протекающим по обмотке управления, формирующей магнитный поток, перпендикулярный магнитному потоку обмотки, включенной в цепь пассивного режекторного LC-фильтра. Это обеспечивает непрерывную подстройку индуктивности реактора и поддержание настройки фильтра.

Фильтр с настраиваемым реактором принципиально является однофазной схемой, что обеспечивает возможность симметрирования фаз в энергосистеме наряду с пофазным снижением гармонических составляющих. При соответствующем управлении может быть предотвращена генерация низших гармоник, в частности, кратных третьей гармонике, в условиях несимметричных режимов сети переменного тока, что невозможно при использовании трёхфазных мостовых схем. Для подключения фильтра с настраиваемым реактором требуется только понижающий трансформатор обычной конструкции, который обеспечивает его присоединение к шинам ВН с учетом напряжения, допустимого для элементов фильтра.

Чтобы оценить долю токов гармоник в нелинейной нагрузке, использован настраиваемый фильтр со схемой регулирования (рис. 1).

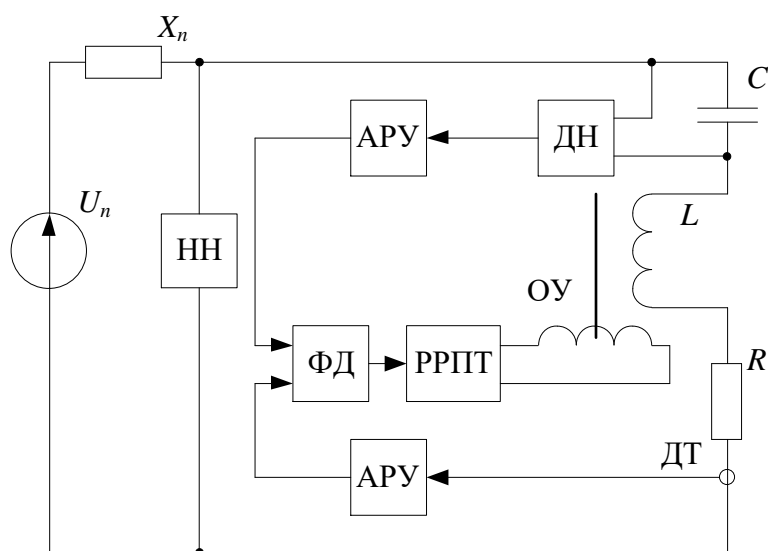


Рис. 1. Схема регулирования настраиваемого фильтра

Схема включает в себя источник синусоидального напряжения U_n , комплексное сопротивление линии связи X_n , индуктивно-настраиваемый реактор L , измерители тока через цепь фильтра ДТ и напряжения на ёмкости C фильтра ДН, фазовый детектор ФД, соединенный с датчиками электрических величин через автоматические регуляторы усиления (делители напряжения) АРУ, релейный регулятор постоянного тока РРПТ обмотки управления реактором ОУ и нелинейную нагрузку НН.

Напряжение на выходе фазового детектора изменяет постоянный ток через обмотку управления таким образом, чтобы обеспечить фазовый сдвиг между напряжением на конденсаторе и током в цепи фильтра на уровне $\pi/2$. Это происходит благодаря изменению индуктивности реактора от 0,06 до 0,04 Гн при регулировании тока управления в пределах 0 – 20 А. В качестве сердечника управляемого реактора использована цилиндрическая катушка из окисленной стальной проволоки. Может быть применен и пакет статорного магнитопровода низкомоментного асинхронного двигателя.

В качестве нелинейной нагрузки рассматривался диодный выпрямитель, питающий емкостную нагрузку [5]. Система регулирования, построенная на основе лабораторного стенда «Передача и качество электроэнергии ПИКЭЭ-СК» и компьютерной программы *DeltaProfi* [6], измеряла потребляемую активную мощность в реальном режиме времени и токи элементов схемы. Сигналы управления для ключей вырабатывались релейным регулятором, определяющим ток в обмотке управления настраиваемого дросселя. Эта схема обеспечивала хорошие характеристики: коэффициент нелинейных искажений тока был менее 5% при полной нагрузке наряду с высоким КПД.

Библиографический список

1. **Шёнфельд, Р.** Автоматизированные электроприводы: [пер. с нем.]; под ред. Ю.А. Борцова / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 464 с.
2. **Вагин, Г.Я.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособие / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2004. – 214 с.
3. **Виджей, К. Суд.** HVDCandFACTSControllers: применение статических преобразователей в энергетических системах: [пер. с англ.] / К. Суд. Виджей. – М.: НИИА, 2009. – 344 с.
4. Энергосберегающие полупроводниковые источники реактивной мощности / А.С. Плехов [и др.] // Промышленная энергетика. - 2012. - №5. - С. 47-51.
5. **Тихомиров, В.А.** Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // В.А. Тихомиров, С.В. Хватов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - 2011. - №3 (90). - С. 204-215.
6. Программно-технический комплекс *DeltaProfi*. – Челябинск: Учтех-Профи, 2014. – 73 с.

УДК 621.3

А.А. Кралин, А.А. Асабин, Е.В. Крюков, В.В. Гуляев

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРВДН ПРИ ПРОДОЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЫХОДНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Статья посвящена изучению регулировочных характеристик тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) в режиме продольного регулирования. Представлены результаты гармонического анализа выходного напряжения ТРВДН, полученные с использованием моделирования в пакете Simulink. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).

The article deals with the thyristor regulator of the booster voltage (TRBV) regulating characteristics research in the longitudinal regulation mode. The results of harmonic analysis of TRBV output voltage obtained with the use of simulation in Simulink are presented. The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement № 14.577.21.0242 on granting subsidies from 26.09.2017, the unique identifier of the project RFMEFI57717X0242).

Ключевые слова: тиристорный регулятор, регулировочные характеристики, продольное регулирование, гармонический анализ.

Key words: thyristor regulator, regulating characteristics, longitudinal voltage control, harmonic analysis.

Одной из актуальных задач энергетической стратегии России до 2035 г. является обеспечение эффективной надежности электроснабжения как городских, так и сельских распределительных сетей [1]. В настоящее время каждый год нагрузка на городские и сельские распределительные сети возрастает на 2 - 3%. При этом сети характеризуются низкой автоматизацией, большим износом, существенной потерей электроэнергии. В связи с этим вопросы поддержания должного уровня и качества напряжения, а также увеличения пропускной способности РЭС весьма актуальны.

Вопросы регулирования параметров электроэнергии, увеличения пропускной способности РЭС могут быть решены с использованием гибких управляемых линий электропередач переменного тока (ГЛЭП) или (в соответствии с терминологией *IEEE*) - *Flexible AC Transmission* [2].

Устройства продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации, построенные на основе твердотельных регуляторов величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) могут быть использованы при построении современных ГЛЭП [3].

Один из вариантов ТРВДН, выполненный с использованием тиристорных ключей представлен на рис. 1 [4].

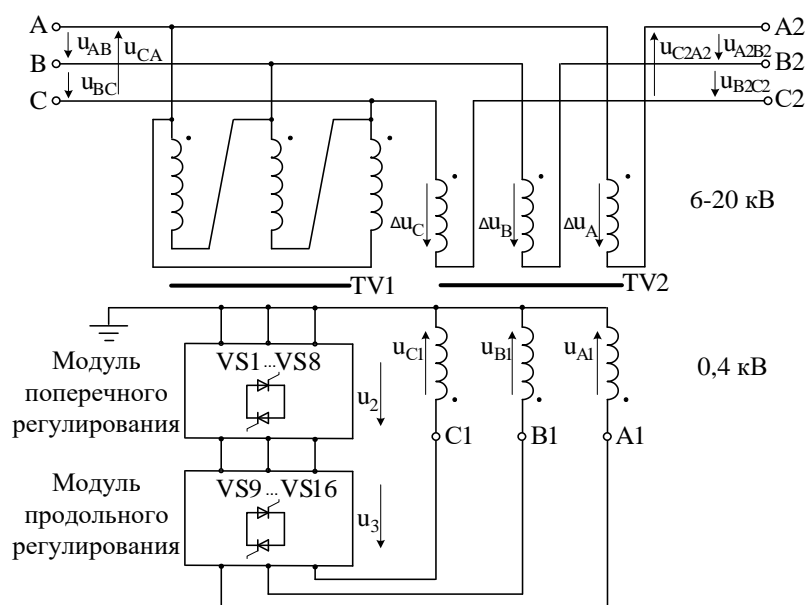


Рис.1. Схема силовой части ТРВДН

Предлагаемый ТРВДН сочетает в себе свойства фазоповоротного трансформатора и устройства РПН, может использоваться для управления потоками мощности в электрических сетях различной конфигурации [5].

Основными узлами силовой части данного ТРВДН являются: параллельный трансформатор $TV1$, тиристорные коммутаторы $VS1-VS16$ модулей продольного и поперечного регулирования, вольтодобавочный трансформатор $TV2$.

Исследование электромагнитных процессов ТРВДН удобнее всего выполнять с помощью компьютерного моделирования. С использованием программы *Matlab Simulink*, позволяющей получить регулировочные характеристики устройства, определить гармонический состав выходного напряжения, определить оптимальные режимы работы при продольном, поперечном и продольно-поперечном управлении.

Модули продольного регулирования позволяют менять величину выходного напряжения относительно входного. Заданный диапазон регулирования величины выходного напряжения относительно входного $D = \pm 10\%$.

В качестве иллюстрации процесса формирования выходного напряжения модулями продольного регулирования на рис. 2 представлены временные диаграммы выходного напряжения ТРВДН в режиме понижения напряжения для угла нагрузки $\varphi=60^\circ$.

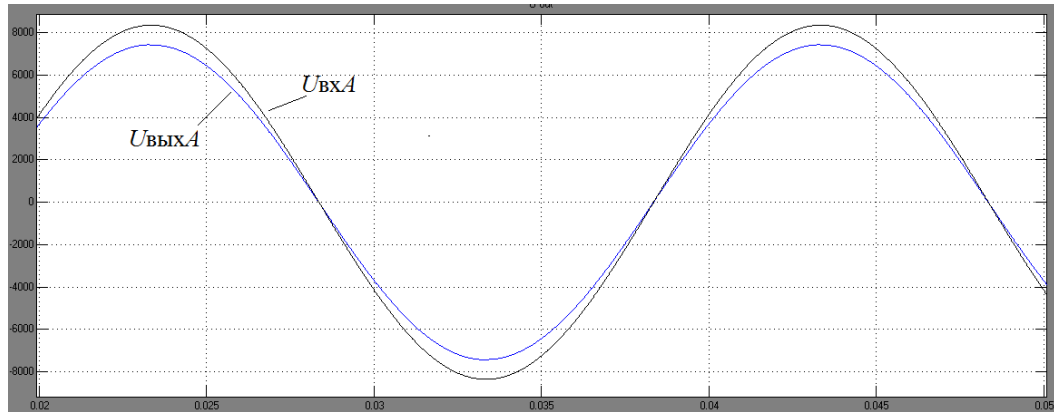


Рис. 2. Временные диаграммы выходного напряжения в режиме понижения напряжения для угла нагрузки $\varphi=60^{\circ}$

На рис. 3 представлены зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих k_D выходного напряжения от напряжения управления в режиме понижения для различных углов нагрузки. Данный коэффициент позволяет определить степень искажения формы выходного напряжения в процессе продольного регулирования.

В ходе проведенных исследований установлено, что при импульсно-фазовом регулировании максимальное значение коэффициента нелинейных искажений соответствует фазовому углу нагрузки $\varphi=60^{\circ}$ и достигает значения 3,5% как в режиме понижения, так и повышения напряжения. Наименьшее значение коэффициента k_D соответствует активной нагрузке ($k_D < 2,4\%$).

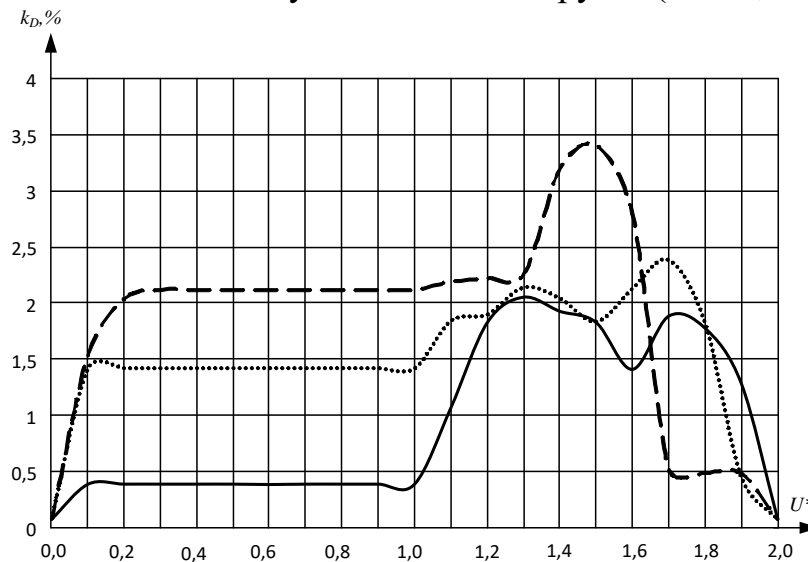


Рис. 3. Зависимости коэффициента нелинейных искажений от напряжения управления при продольном регулировании для углов нагрузки:
 — $\varphi=0^{\circ}$; $\varphi=30^{\circ}$; — — $\varphi=60^{\circ}$

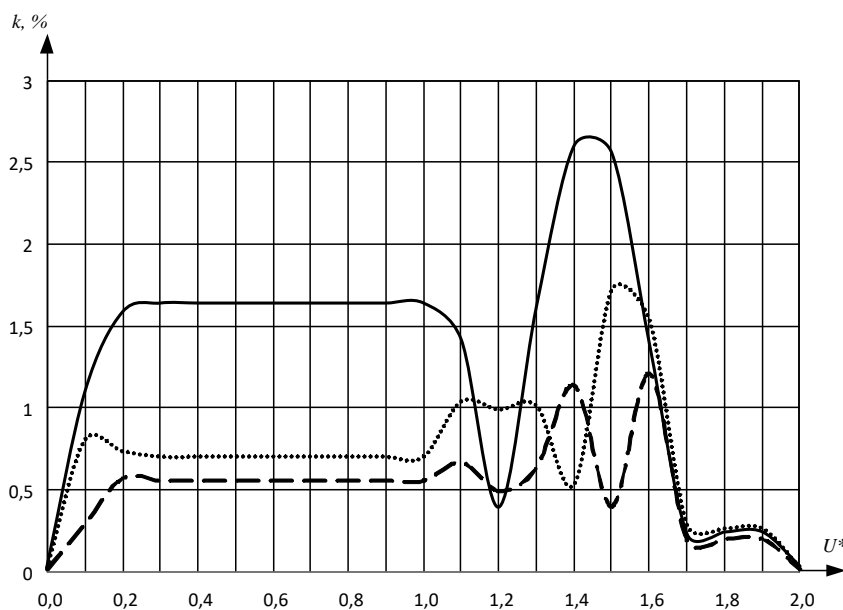


Рис. 4. Зависимости изменения коэффициентов 5, 7, 11-й гармоник выходного напряжения от величины напряжения управления для угла нагрузки $\varphi=60^{\circ}$:
 — коэффициент 5-й гармоники; коэффициент 7-й гармоники;
 - - - коэффициент 11-й гармоники

Как было уже отмечено, наибольшее значение коэффициента нелинейных искажений наблюдается при углах нагрузки $\varphi=60^{\circ}$. В связи с этим анализ гармонического состава выходного напряжения следует производить именно для этого угла нагрузки. На рис. 4 представлены зависимости изменения коэффициентов 5, 7, 11-й гармоник от величины напряжения управления при продольном регулировании в режиме понижения напряжения.

Анализ зависимостей (рис. 4) показывает, что максимальное значение имеет коэффициент 5-й гармонической составляющей (2,6%). В режиме понижения напряжения максимальное значение коэффициента 7-й гармоники составляет 1,7% в режиме повышения напряжения 1,6%. Коэффициент 11-й гармонической составляющей в режиме понижения напряжения составляет 1,2%, в режиме повышения напряжения 1,3%.

Выводы

1. При продольном регулировании в режиме понижения напряжения действующее значение выходного напряжения меняется приблизительно на 10%. В режиме повышения напряжения изменение напряжения составляет 9,4%.

2. Выходное напряжение ТРВДН при продольном регулировании отвечает требованиям ГОСТ 32144-2013 для сетей среднего напряжения: значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не превышает 3%; значения коэффициента пятой 2,6%; седьмой 1,7%; одиннадцатой 1,2%.

Библиографический список

1. Концепция реализации национального проекта «Интеллектуальная энергетическая система России». – М., 2015. – 25 с.
2. **Соснина, Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – №5. – С. 25 - 28.
3. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ. / Е.Н. Соснина [и др.] // Пром-инжиниринг: сб. тр. 2-й Междунар. научно-технич. конфер.– Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322 - 327.
4. Power flow control device prototype tests / E. Sosnina [et al.] // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia. – 2016. – P. 312 - 316.
5. **Соснина Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст., 2017. - С. 132-136.

УДК 621.314

Е.В. Калинин

**ПОТЕРИ В СТЫКАХ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ.
ЧАСТЬ 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОСНОВНЫХ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИРОСТА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

На основе экспериментов с П-образным и кольцевым шихтованными сердечниками определены уровни и структурные составляющие прироста потерь в косых стыках в функции насыщения при различных количествах пластин в шихтовке. Предложены формулы определения прироста и структуры потерь в косых стыках сердечника трансформатора по результатам измерения потерь для двух вариантов шихтовки.

Based on experiments with П-shaped and annular laminated cores, the levels and structural components of loss growth in the oblique joints in saturation function are determined for different amounts of plates in the batching. A formula is proposed for determining the increment of losses and the structure of increment of losses in the oblique joints of transformer core, from results of the losses measurement for two batching options of plates.

Ключевые слова: шихтованный сердечник трансформатора, холоднокатаная электротехническая сталь, косые стыки, структура прироста электромагнитных потерь, экспериментальное исследование, разделение потерь.

Key words: laminated transformer core, cold-rolled electrical steel, oblique joints, structure of increment of electromagnetic losses, experimental study, separation of losses.

Электромагнитные потери P , (далее – потери, называемые также потерями холостого хода), являются важной характеристикой силовых трансформаторов как постоянная составляющая энергетических потерь. Внедрение современных текстурованных холоднокатаных электротехнических сталей и переход на конструкции магнитных систем с косыми стыками существенно улучшили их энергетические показатели за счет низких значений удельных магнитных потерь и повышенного уровня рабочей индукции в направлении прокатки (НП). При этом для текстурованных сталей характерны ребровая структура, резко выраженная анизотропия магнитных свойств и крупная полосовая доменная структура (ДС) [1].

Наличие стыков ухудшает характеристики сердечников по сравнению со свойствами стали [2]. Особая равновесная (ДС), способная к дроблению в зависимости от стягивающих усилий и динамики перемагничивания db/dt , делает магнитные свойства чувствительными к любому изменению воздействий [1, 3]. Значительные усилия приложены к совершенствованию конструкций стыков. Однако структура увеличения потерь в стыках изучена слабо, в том числе по причине высокой чувствительности ДС текстурованных сталей.

В работе экспериментально изучаются основные влияющие факторы прироста потерь в косых стыках. Ранее были опубликованы результаты экспериментального исследования степени влияния стыков на потери P в кольцевом сердечнике №1 - (С№1) из динамной холоднокатаной стали 2412 толщиной $d1 = 0,5$ мм [4] (измерения проводились в ЦЗЛ Верх-Исетского металлургического завода). Описан способ разделения потерь в стыках на структурные составляющие, определены характер их зависимости от насыщения стали и фактические процентные соотношения. Однако уровень удельных потерь стали 2412 при частоте $f = 50$ Гц и индукции $B_m = 1,5$ Тл - Руд = 4,2 Вт/кг значительно выше удельных потерь лучших марок современной трансформаторной стали, которые при $d = (0,28-0,23)$ мм и рабочей индукции $B_m = 1,7$ Тл менее 1,1 Вт/кг, а при $d = 0,15$ мм – 0,65 Вт/кг. Представляется интересным перенести полученные в [4] результаты на текстурованные стали.

Поэтому в работе дополнительно проводятся исследования влияния стыков на потери П-образного сердечника №2 (С№2) из текстурованной стали 3406 толщиной $d2 = 0,3$ мм с четырьмя 45-градусными стыками. Ширина пластин $b2 = 0,12$ м, длина средней силовой линии сердечника $L_{cp.2} = 2,505$ м, вес $G = 13,8$ кг (эксперименты проводились в лаборатории магнитных измерений ВИТ, г.Запорожье). Для возможности сопоставления прироста потерь в стыках исследуемых сердечников введём величину кратность доли стыков q , равную отношению суммарной длины стыков сердечника $L_{ст}$ к длине L_{cp} . У сердечника С№2 $L_{ст} = 4b2 \cdot \sqrt{2}$ (рис. 1, а) и $q2 = L_{ст} / L_{cp.2} = 1/3,7$. У мощных силовых трансформаторов значения q будут находиться в пределах $q = 1/(2,0-2,8)$ [2].

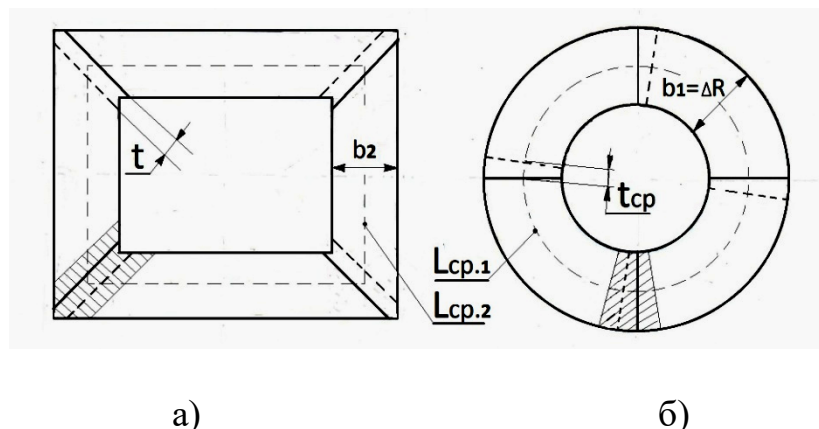


Рис. 1. Основные размеры и зоны стыков сердечников (заштриховано):
 а - С№2 из текстурованной стали 3406, $d2 = 0,3$ мм ; б - С№1 из динамной стали 2412, $d1 = 0,5$ мм

Намагничивающая и измерительная обмотки намотаны равномерно по длине обеих стержней. Измерения потерь проводились на частоте $f = 50$ Гц при синусоидальном магнитном потоке. Результаты сведены в табл. 1 и 2. Зна-

чения потерь P определены в функции насыщения при изменении следующих параметров стыка: количества пластин в шихтовочной позиции m , длины перекрытия пластин в стыке t и величины технологического воздушного зазора z , приведены значения наибольшего процента их относительного изменения δP для различных B_m .

Таблица 1

Потери в С№2 при $f = 50$ Гц и $m = 1$ при различных B_m в зависимости от изменения: перекрытия пластин в стыке $t = (4;8;10;12;20)$ мм при $z = \text{const}$ и воздушного зазора $z = (0,1;3;5)$ мм при $t = \text{const}$

$f = 50$ Гц $B_m, \text{Тл}$	Потери P , Вт, при $z = 3$ мм						Потери P , Вт, при $t = 12$ мм				
	t , мм						z , мм				
	4	8	10	12	20	$\delta P, \%$	0	1	3	5	$\delta P, \%$
0,5	1,49	1,49	1,49	1,49	1,50	0,7	1,45	1,48	1,49	1,49	2,7
1,0	5,5	5,6	5,6	5,61	5,71	3,8	5,45	5,50	5,61	5,66	3,5
1,4	11,0	11,0	11,1	11,3	11,4	3,6	10,9	11,2	11,3	11,3	3,7
1,5	12,7	12,8	12,9	12,9	13,1	3,1	12,5	12,7	12,8	12,8	3,2
1,7	17,2	17,5	17,6	17,6	18,0	4,7	17,5	17,5	17,6	18,0	2,9

Как следует из табл. 1 при возрастании перекрытия t в пять раз увеличение мощности потерь P не превышает $\delta P \leq 4,7\%$. Слабая зависимость $P(t)$ при различных $B_m = \text{const}$ свидетельствует о том, что в зоне стыка направление вектора магнитной индукции \vec{B} из-за резко выраженной магнитной текстуры стали практически не отклоняется от НП во всем диапазоне индукций. По этой причине при минимальных значениях параметров стыка ($m = 1, t = 4$ мм, $z = 0$ и индукции $B_m = (1,0-1,7)$ Тл) среднее увеличение удельных потерь в сердечнике по отношению к удельным потерям при намагничивании вдоль НП стали 3406 незначительно и составило менее 13%. Результаты, представленные в табл. 1 справа, подтверждают также и слабую зависимость $P(z)$ от величины зазора при различных $B_m = \text{const} - \delta P \leq 3,7\%$.

Это соответствует и данным [4], где после разрезания сплошного С№1 из динамной стали 2412 с шириной пластин $b_l = \Delta R = 0,0606$ м, $L_{\text{ср.1}} = 0,536$ м и весом $G = 0,959$ кг на четыре части (рис. 1, б) и последующей шихтовки в одну пластину при $m = 1, t_{\text{ср}} = 7,5$ мм и $z = 1,5$ мм (кратность доли стыков $q_1 = 4b_l / L_{\text{ср.1}} = 1/2,2$) изменение P при индукции $B_m = (1,0-1,5)$ Тл также не превысило 10,8%.

С учетом результатов анализа табл.1 делаем вывод, что структура потерь P в шихтованном С№2 без влияния стыков и их прироста в косых стыках ΔP при различных $B_m = \text{const}$ аналогичны используемой в [4]:

$$P = P_{\Gamma} + P_{\text{В}}, \tag{1}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\text{В}} + P_{\text{Вп}}, \quad (2)$$

где ΔP_{Γ} , $\Delta P_{\text{В}}$ – составляющие прироста потерь на гистерезис и вихревые токи от неоднородности магнитного потока; а $P_{\text{Вп}}$ – потери на вихревые токи от нормальной к плоскости пластин составляющей магнитного потока $\Phi_{\text{п}}$ в области, прилегающей к зоне стыка.

При шихтовке в одну пластину ($m = 1$) из-за невысокого общего уровня прироста потерь ΔP сложно определить долевого вклад компонент выражения (2). При увеличении количества пластин в шихтовке с $m = 1$ до $m = 2; 4$ и фиксированном зазоре ($z = \text{const}$) в такой же пропорции возрастают и потери – $\delta P_{\text{ср}} \approx 8; 18\%$, при этом зависимость от изменения перекрытия в стыке t с 5 до 8 мм остается весьма слабой (табл. 2). Такие результаты согласуются с выводами [4], где значительная доля прироста приходится на $P_{\text{Вп}}$.

Таблица 2

Потери в С№2 при $f = 50$ Гц и $z = \text{const}$ при различных $B_{\text{м}}$ в зависимости от изменения числа пластин в шихтовке $m = (1; 2; 4)$ для двух вариантов перекрытия в стыке t

$f = 50$ Гц $B_{\text{м}}, \text{Тл}$	Потери P , Вт, при $z = 2$ мм							
	$t = 5$ мм				$t = 8$ мм			
	$m = 1$	$m = 2$	$m = 4$	$\delta P, \%$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 4$	$\delta P, \%$
0,5	1,49	1,58	1,73	16,1	1,49	1,60	1,75	17,4
1,0	5,45	5,76	6,26	14,9	5,46	6,00	6,35	16,3
1,4	11,0	11,8	13,0	18,2	11,0	11,8	12,9	17,3
1,5	12,7	13,7	15,3	20,0	12,8	13,8	15,2	18,7
1,7	17,2	18,5	20,6	19,7	17,5	18,6	20,5	17,1

При очевидности и достоверности полученных результатов решить задачу разделения потерь в стыках С№2 не удастся из-за высокой чувствительности полосовой ДС текстурованной стали 3406 [1, 3]. К тому же с ростом насыщения не выполняется условие неизменности магнитного потока по периметру сердечника на участках, свободных от обмоток.

Задача перемагничивания П-образного С№2, где вектор \bar{B} на всех участках не отклоняется от НП, эквивалентна рассмотрению кольцевого С№1 из изотропного материала со «спрямленными» косыми стыками (рис.1). Вернемся к рассмотрению представленных ранее в [4] результатов исследований потерь в стыках С№1 с содержанием 3% Si и ребровой структурой, как и текстурованные стали, но с мелкой, не чувствительной к динамике ДС [1, 3]. Сходство характера зависимости от $B_{\text{м}}$ структурных составляющих (1) потерь P_{Γ} и $P_{\text{В}}$ стали 2412 в исследуемом диапазоне индукций позволяет с незначительным допущением установить равенство их относительных приращений при различных $B_{\text{м}} = \text{const}$:

$$\Delta P_{\Gamma} / P_{\Gamma} \approx \Delta P_{\text{В}} / P_{\text{В}} = (\Delta P_{\Gamma} + \Delta P_{\text{В}}) / (P_{\Gamma} + P_{\text{В}}) = \Delta P_{\text{ТВ}} / P. \quad (3)$$

С учетом (2), (3) имеем следующую структуру относительного приращения электромагнитных потерь в сердечнике со стыками:

$$\delta P = \Delta P / P \cdot 100\% = (\Delta P_{ГВ} + \Delta P_{Вп}) / P \cdot 100\% = \delta P_{ГВ} + \delta P_{Вп} . \quad (4)$$

При наличии стыков дополнительные потери на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока $P_{Вп}$ в выражении (1) формируются в условиях резкого поверхностного эффекта [5] и пропорциональны: $P_{Вп} \equiv f^{3/2}$. Это делает невозможным частотное разделение потерь в сердечнике со стыками. Поэтому потери $P_{Г}$ определялись в статическом режиме перемагничивания ($f = 0$) на установке измерения петель гистерезиса HBS-40S (Япония) сначала в сплошном кольцевом С№1, а затем в сердечнике со стыками. С целью получения большего эффекта выбран вариант с числом пластин в шихтовке $m = 8$. В итоге определена зависимость прироста гистерезисных потерь $\Delta P_{Г}(B_m)$, а с последующим использованием (2), (3) находим характер зависимости $\delta P_{ГВ}(B_m)$.

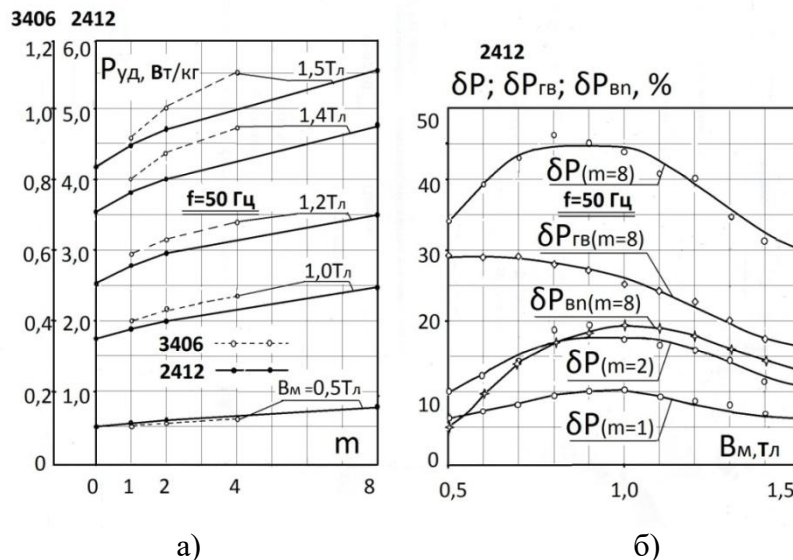


Рис. 2. Зависимости удельных потерь $P_{уд}(m)$ в сердечниках (рис. 1) из сталей 3406 (пунктир) и 2412 (сплошные) при $f = 50$ Гц и различных B_m (а); зависимости относительного прироста потерь от индукции $\delta P(B_m)$ в стыках сердечника из стали 2412 при $f = 50$ Гц для различных m и составляющих $\delta P_{ГВ}(B_m)$ и $\delta P_{Вп}(B_m)$ для $m = 8$ (б)

На рис. 2, а представлены для сравнения зависимости удельных потерь от числа пластин в шихтовочной позиции $P_{уд}(m)$ при $f = 50$ Гц для различных значениях индукции $B_m = const$ исследуемых сердечников из сталей 3406 и 2412 (рис.1). Уровень $P_{уд}$ сталей отличается в 5 раз, поэтому и относительный прирост потерь $P_{уд}(m)$ в зоне рабочих индукций у стали 3406 больше, чем у стали 2412. Это свидетельствует об увеличении доли потерь $P_{Вп}$ в стыках для стали 3406 по отношению к стали 2412.

На рис. 2, а представлены для сравнения зависимости удельных потерь от числа пластин в шихтовочной позиции $P_{уд}(m)$ при $f = 50$ Гц для различных

значениях индукции $B_m = \text{const}$ исследуемых сердечников из сталей 3406 и 2412 (рис.1). Уровень $P_{уд}$ сталей отличается в 5 раз, поэтому и относительный прирост потерь $P_{уд}(m)$ в зоне рабочих индукций у стали 3406 больше, чем у стали 2412. Это свидетельствует об увеличении доли потерь $P_{вп}$ в стыках для стали 3406 по отношению к стали 2412.

На рис. 2, б представлены экспериментальные зависимости относительного прироста потерь в стыках С№1 $\delta P(B_m)$ из стали 2412 при $m = 1; 2$ и 8 для $f = 50$ Гц, а также их структурных составляющих $\delta P_{гв}(B_m)$ и $\delta P_{вп}(B_m)$ при $m = 8$. Значения $\delta P_{вп}$ при различных B_m на рис. 2, б получены из равенства (4): $\delta P_{вп} = \delta P - \delta P_{гв}$. Анализ функций на рис. 2, б показывает:

- кривые прироста потерь $\delta P(B_m)$ при различных значениях m имеют одинаковый характер и расположение максимумов при индукции $B_m \approx 1$ Тл, хотя кривые структурных составляющих $\delta P_{гв}$, $\delta P_{вп}(B_m)$ принципиально отличаются друг от друга;

- кривая $\delta P_{гв}(B_m)$ имеет максимальные значения в ненасыщенных режимах, а с ростом насыщения асимптотически спадает, что связано с возрастающим переходом магнитного потока в зазор стыка. Зависимость $\delta P_{вп}(B_m)$ достигает максимума при $B_m = (0,9-1,2)$ Тл и также спадает с дальнейшим ростом индукции;

- физические процессы в стыке, обуславливающие особенности зависимостей $\delta P_{гв}$ и $\delta P_{вп}$ от B_m в пределах одной марки стали с изменением m не меняются, что приводит к выводу о независимости от m долевого соотношения - $\Delta P_{гв}(B_m)$ и $P_{вп}(B_m)$.

Сопоставляя на рис. 2, а значения $\Delta P_{уд}(m)$ при различных B_m на графиках $P_{уд}(m)$ для сталей 2412 и 3406, можно отметить, что в обоих случаях зависимости прироста потерь в стыках от m при различных B_m имеют одинаковый выпуклый характер. Методом логарифмирования экспериментальных зависимостей $\Delta P_{уд}(m)$ (не менее, чем по трем точкам) установлена аппроксимирующая формула, которая для обоих сердечников имеет вид

$$\Delta P_{уд.m} = \Delta P_{уд.1} \cdot m^{0,72}. \quad (5)$$

При использовании формулы (5) расчетные формулы показывают хорошее согласие с экспериментальными значениями в отмеченных точках (рис. 3, а). Однако для расчета $\Delta P_{уд.m}$ – прироста удельных потерь в шихтованном сердечнике со стыками при любом m - необходимо знать прирост $\Delta P_{уд.1}$ при $m = 1$ по отношению к сердечнику без стыков.

Для определения $\Delta P_{уд.1}$ в формуле (5) при различных B_m достаточно иметь разницу потерь $\Delta P_{уд}$ двух вариантов шихтовки. Например, для $m = (1; 4)$ получаем выражение

$$\Delta P_{уд.1} = (P_{уд.4} - P_{уд.1}) / (4^{0,72} - 1) = \Delta P_{уд.(4;1)} / 1,71, \quad (6)$$

где $P_{уд.4}$, $P_{уд.1}$ - значения удельных потерь в сердечнике при $m = 4$ и $m = 1$ соответственно.

Например, при $B_m = 1,5$ Тл из табл. 2 дополнительный прирост удельных потерь в С№2 при переходе от $m = 1$ к $m = 4$ равен

$$\Delta P_{уд.(4;1)} = (P_4 - P_1)/G = 2,6/13,8 = 0,188 \text{ Вт/кг.}$$

Из выражения (6) находим для $m = 1$ значение $\Delta P_{уд.1(№2)}$

$$\Delta P_{уд.1(№2)} = 0,188/1,71 = 0,11 \text{ Вт/кг.}$$

Теперь из (5) можно рассчитать прирост потерь для любого m . Так, для $m = 2$

$$\Delta P_{уд.2(№2)} = 0,11 \cdot 2^{0,72} = 0,11 \cdot 1,65 = 0,182 \text{ Вт/кг.}$$

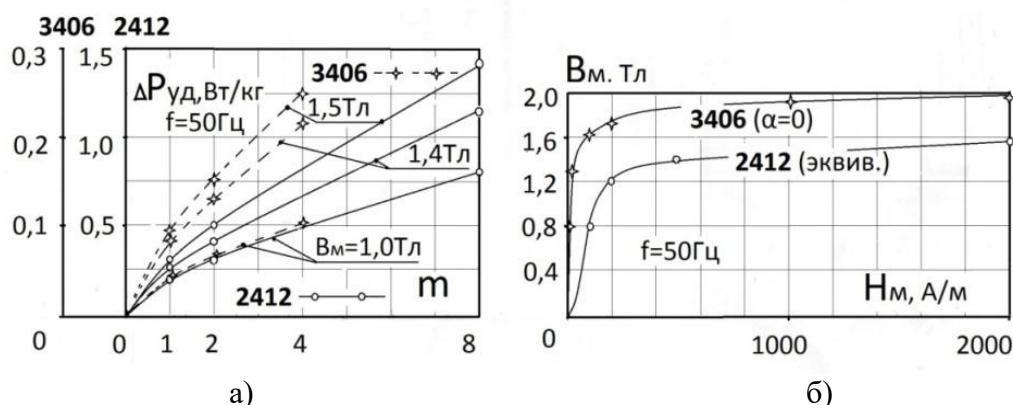


Рис. 3. Значения прироста удельных потерь в сердечниках из стали 3406 и 2412 при $f=50$ Гц и индукции $B_m = 1,0; 1,4$ и $1,5$ Тл при различных m и аппроксимация зависимостей от m формулой (5) (а) и кривые намагничивания $B_m(H_m)$ при $f = 50$ Гц стали 3406 вдоль НП ($\alpha = 0$) и эквивалентная кольцевого сердечника из стали 2412 (б)

Сопоставим полученный результат с данными для С№1 на рис. 2. При $B_m=1,5$ Тл и $P_{уд}=4,22$ Вт/кг относительные доли составляющих прироста потерь для $m = 8$

$$\delta P_{гв(№1)} - 17\%; \quad \delta P_{вн(№1)} - 13\%$$

или в абсолютном выражении

$$\Delta P_{уд.гв(№1)}=0,72 \text{ Вт/кг}; \quad P_{уд.вн(№1)}=0,55 \text{ Вт/кг.}$$

При переходе к стали 3406 (табл. 3) изменяются параметры q ; m ; d ; b и уровень удельных потерь стали $P_{уд}$. Соответствующие коэффициенты пересчета K_q , K_m , K_d , K_b и K_p и формулы (7), (8) для определения составляющих $\Delta P_{уд.гв(№2)}$ и $P_{уд.вн(№2)}$ С№2 из стали 3406 сведены в табл. 3. (Выражение для коэффициента $K_b = \sqrt{b_1/b_2}$ получено во второй части работы при изучении возможностей снижения потерь в стыках).

Используя (7), (8), получаем

$$P_{уд.вн}(№2)=0,55/8,19=0,067 \text{ Вт/кг}; \Delta P_{уд.гв}(№2)=0,72/58,8=0,012 \text{ Вт/кг}.$$

Расчетное значение прироста удельных потерь для стали 3406 при $B_m = 1,5$ Тл и $m = 1$

$$\Delta P_{уд.1}(№2) = 0,067+0,012= 0,079 \text{ Вт/кг},$$

что меньше экспериментального, равного - 0,11 Вт/кг.

Сравнение характеристик $B_m(H_m)$ сталей при $f = 50$ Гц на рис. 3. б показывает, что значение $B_m = 1,5$ Тл для стали 2412 находится на пологом (насыщенном) участке кривой намагничивания, а для стали 3406 – на колене кривой. Для стали 2412 – это соответствовало бы индукции $B_m \approx 1,15$ Тл, при которой уровень составляющих потерь выше:

$$\begin{aligned} \delta P_{уд.гв} &= 23,5\%; & \Delta P_{уд.гв}(№1) &= 0,99 \text{ Вт/кг}; \\ \delta P_{вн} &= 18,5\%; & P_{вн}(№1) &= 0,78 \text{ Вт/кг} \quad (\text{рис. 2. б}). \end{aligned}$$

Результаты расчетов по ним значений $P_{вн}(с.2)$ и $\Delta P_{гв}(№2)$ по выражениям (7), (8) сведены в табл. 3. Для стали 3406 при $B_m = 1,5$ Тл и $m = 1$ $\Delta P_{уд.1}(№2) = 0,112$ Вт/кг; при $m = 2$ с использованием (5) $\Delta P_{уд.2}(№2) = 0,185$ Вт/кг, что согласуется с экспериментом. Соотношение составляющих прироста потерь в стыке для С№2 из стали 3406 при этом равно

$$P_{вн}(№2)/\Delta P_{гв}(№2) = 5,6.$$

Таблица 3

Пересчет значений составляющих прироста удельных потерь в С№1 из стали 2412 на сердечник №2 из стали 3406 при $f=50$ Гц и $B_m=1,5$ Тл

С№1 - сталь 2412	q	m	d , мм	$P_{уд}$, Вт/кг	$\Delta P_{гв}$, Вт/кг	$P_{вн}$, Вт/кг	$\Delta P_{уд}$, Вт/кг
	1/2,2	8	0,5	4,22	0,99	0,78	1,77
$Kq = q1 / q2 = 1,68$ $Km = \left(\frac{m1}{m2}\right)^{0,72} = 4,77$ $Kd = \left(\frac{d1}{d2}\right)^{0,72} = 1,44$ $Kb = \sqrt{b1/b2} = 0,71$ $Kp = P_{уд.1}/P_{уд.2} = 5,1$	Для С№2 расчетный прирост $\Delta P_{уд.1}(№2)$ при $m = 1$: $P_{вн}(№2) = P_{вн}(№1)/(Kq \cdot Km \cdot Kd \cdot Kb) = 0,78/8,19 = 0,095$ Вт/кг (7) $\Delta P_{гв}(№2) = \Delta P_{гв}(№1)/(Kq \cdot Km \cdot Kd \cdot Kp) = 0,99/58,8 = 0,017$ Вт/кг (8) $\Delta P_{уд.1}(№2) = \Delta P_{гв}(№2) + P_{вн}(№2) = 0,017 + 0,095 = 0,112$ Вт/кг Соотношение: $P_{вн}(№2)/\Delta P_{гв}(№2) = 0,095/0,017 = 5,6$						
С№2 – сталь 3406	1/3,7	1	0,3	0,82	0,017	0,095	0,112
	1/3,7	2	0,3	0,82	0,028	0,157	0,185

Проведенные исследования позволили определить структуру потерь в стыках, показать доминирующее влияние на прирост потерь $\Delta P_{уд}(B_m)$ составляющей $P_{вн}$, выявить закон изменения $\Delta P_{уд}$ от m (5) и использовать полученную аппроксимацию для определения значений $\Delta P_{уд} 1(B_m)$ – важной связую-

щей величины для расчетов прироста потерь в стыках шихтованных сердечников.

Во второй части работы проводятся исследования зависимостей составляющих прироста потерь в стыках шихтованных сердечников трансформаторов от частоты f , даются практические рекомендации по снижению прироста потерь в стыках.

Библиографический список

1. **Дружинин, В.В.** Магнитные свойства электротехнических сталей / В.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
2. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
3. **Зайкова, В.А.** Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей / В.А. Зайкова, И.Е. – М.: Наука, 1992. - 272 с.
4. **Калинин, Е.В.** Исследование влияния стыков на потери в шихтованных сердечниках / Е.В. Калинин // Электропривод и автоматизация промышленных установок: Межвуз. сборн. науч. тр. – Н.Новгород: ГПИ им. А.А. Жданова, – 1987. – С.51-55.
5. **Ламмеранер, Й.** Вихревые токи / Й. Ламмеранер. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.

УДК 621.314

А.С. Борисов, Д.А. Алешин, Н.Н. Вихорев

ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Статья посвящена повышению эффективности работы полупроводниковых преобразователей. Предложенное решение позволяет уменьшить токовые нагрузки отдельных ключевых элементов и снизить требования к выходному емкостному фильтру. Приведены результаты имитационного моделирования.

The article is devoted to rising the efficiency of semiconductor converters. The proposed solution allows reducing the current loads of individual switch elements and decreasing the requirements for the output capacitive filter. Results of simulation modeling are presented.

Ключевые слова: инвертор напряжения, параллельная работа инверторов напряжения, широтно-импульсная модуляция, ШИМ, емкостной фильтр.

Key words: voltage inverter, parallel operation of voltage inverters, pulse width modulation, PWM, capacitive filter.

В настоящее время IGBT применяются в самых разнообразных преобразовательных устройствах, решая задачи интеграции возобновляемых источников электроэнергии в единую энергетическую сеть, регулирования перетоков активной и реактивной мощностей, преобразования рода тока и числа фаз, и т.д.

Однако, учитывая непрерывный рост уровня потребления электроэнергии, разработчики преобразовательного оборудования сталкиваются с задачей увеличения рабочих мощностей электрических устройств. Один из способов наращивания максимальной мощности преобразователя на IGBT-транзисторах – параллельное соединение силовых ключей [1], что накладывает жесткие требования на времена их отпирания/запирания, несоблюдение которого незамедлительно приведет к аварии. В дополнение к этому решению могут быть применены магнитосвязанные индуктивные делители тока, снижающие скорость нарастания токов через транзисторы. Такой подход технически сложен и снижает надежность устройства.

Предлагаемый способ увеличения мощности заключается в совместной работе двух и более инверторов напряжения с общим емкостным накопителем на общую нагрузку. При этом ШИМ - генератор каждого из инверторов формирует пилообразные импульсы с фазовым сдвигом относительно других инверторов в соответствии с законом [2]

$$T = (N - 1)/N \cdot 100\%,$$

где T – фазовый сдвиг ШИМ для каждого из инверторов; N – общее количество инверторов.

Структурная схема устройства приведена на рис. 1.

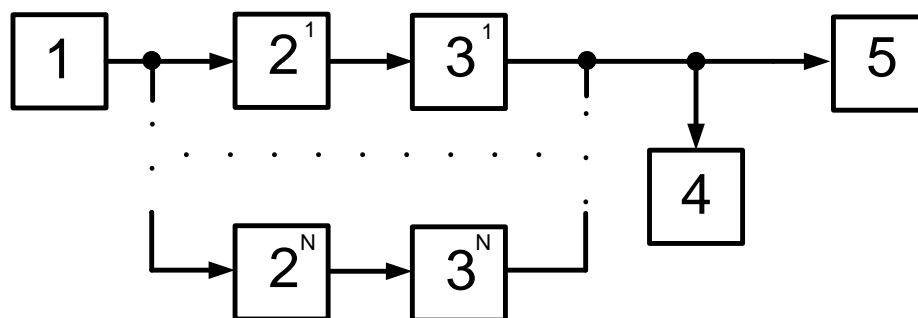


Рис. 1. Структурная схема устройства:

1 – двухплечевой емкостной накопитель; 2 – полумостовой инвертор напряжения;
3 – индуктивный фильтр; 4 – выходная емкость; 5 – общая нагрузка

Формирование фазового смещения ШИМ для преобразователей позволяет увеличить суммарное количество пульсаций токов фильтрующих дросселей, тем самым снизить требования к выходной емкости, а следовательно, снизить массогабаритные показатели электрического фильтра. На рис. 2 приведены токи индуктивных фильтров. Из рис. 2 видно, что токи через фильтры смещены друг относительно друга на 180 электрических градусов.

Ток через общую нагрузку продемонстрирован на рис. 3.

Предлагаемый способ организации параллельной работы инверторов напряжения также позволяет повысить надежность преобразователя, поскольку силовые ключи каждого канала фазы функционируют независимо друг от друга. Отличающиеся по мгновенным значениям токи ограничены индуктивностями фильтров, тем самым обеспечивается токовая развязка между каналами фаз преобразователя. При этом снижается влияние технологического разброса между временами отпираания / запираания IGBT–транзисторов.

Приведенный подход позволяет увеличить мощность преобразователя напряжения, снизить емкость выходного фильтра в сравнении с методом параллельного соединения полностью идентичных преобразователей, а также повысить надежность работы силовых ключей, избегая их параллельной работы.

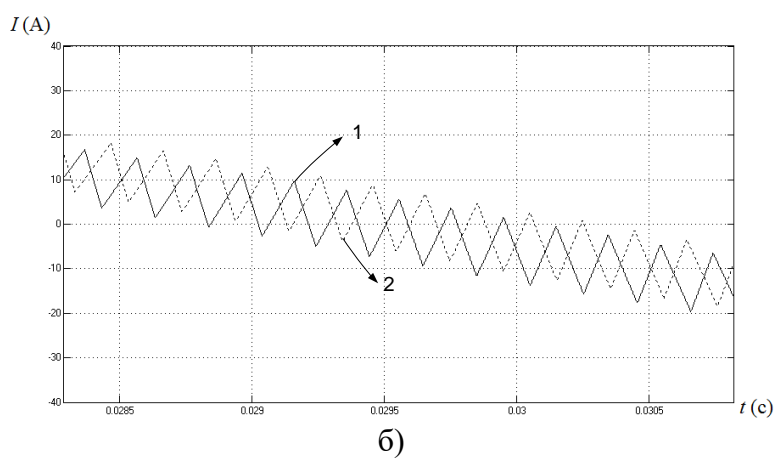
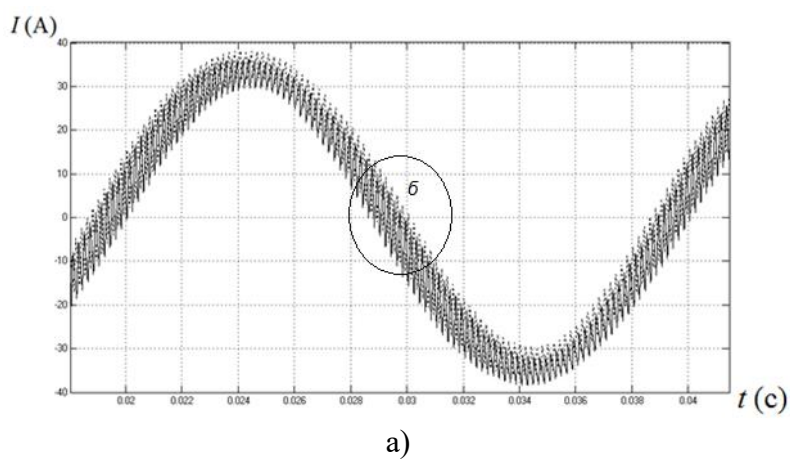


Рис. 2. Токи индуктивных фильтров:

1 - ток через дроссель, подписанный на структурной схеме 3^1 ;
 2 - ток через дроссель, подписанный на структурной схеме 3^N ;
 N - число устройств ($N=2$)

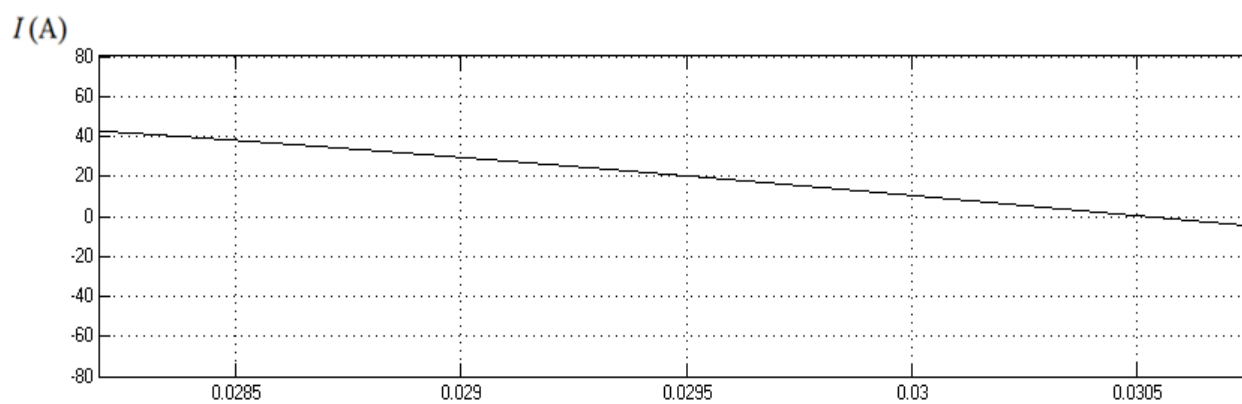


Рис. 3. Ток нагрузки

Библиографический список

1. **Колпаков, А.** Особенности параллельного соединения модулей IGBT / А. Колпаков // Компоненты и технологии, 2005. – №8. – С. 23-29.
2. Пат. 2474036 Российская Федерация, МПК H02M 7/493. Способ управления синхронизацией и сдвигом фазы широтно-импульсной модуляции силовых транзисторов / Р. Джонс, Р. Фалчер, Х. Стиесдал; заявитель и патентообладатель КОНВЕРТИМ ТЕКНОЛОДЖИ ЛТД (GB) - №2008119525/07; заявл. 19.05.2008; опубл. 27.01.2013. Бюл. №3.

УДК 52.505

А.А. Башев

О ВЫБОРЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИДЕНТИФИКАЦИИ И АДЕКВАТНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы выбора и адекватности математических моделей систем. Определяются задачи параметрической идентификации и идентификации системы как черного ящика на основе моделей Вольтерра.

Features of identification of nonlinear systems on the basis of analysis for input actions and output responses are considered. Identification of systems is done by the use of the theory of functional Volterra series.

Ключевые слова: математические модели, нелинейные системы, идентификация, ряды Вольтерра.

Key words: mathematical models, nonlinear systems, Volterra series.

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, 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 его отражающей. 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. Важнейшее требование к математической модели - адекватность 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, оставшиеся неучтенными при моделировании, например, из-за их неизвестности, могут в корне изменить картину результатов моделирования, и модель 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 ис-

пользовался 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. Под математической моделью системы при этом понимают системный оператор, ставящий в однозначное соответствие с заданной точностью выходной и входной сигнал системы.

Класс исследуемой системы, ее входные и соответствующие им выходные сигналы - это та необходимая информация, имея которую можно приступить к построению модели. Степень использования априорной информации и ее достоверность влияют на математическую постановку задачи и способы ее решения. В этом случае различают два подхода к решению задач идентификации.

Для первого подхода известна структура системы, и в результате решения задачи идентификации необходимо отыскать параметры системы. Это параметрическая идентификация.

Для второго подхода характерно отсутствие или недостаточна информация об исследуемой системе, что вынуждает рассматривать ее как «черный ящик». Это обстоятельство вызывает большие трудности в выборе математической модели, но дает возможность использовать ее для систем с различной физической сущностью.

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.

Рассмотрим некоторые вопросы идентификации нелинейных систем. Наиболее просто она решается для безынерционных систем, т.е. систем, осуществляющих мгновенное преобразование входного сигнала в выходной.

Данная работа посвящена рассмотрению подхода, использующего для описания нелинейных систем функциональные разложения Винера - Вольтерра:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \iint_{-\infty}^{+\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 + \dots + \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)x(t-\tau_1)\dots x(t-\tau_n)d\tau_1\dots d\tau_n,$$

где $y(t)$ понимается отклонение отклика динамической системы от своего стационарного значения в результате подачи на вход возмущения $x(t)$. При этом предполагается непрерывная зависимость $y(t)$ от $x(t)$. Функции $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ называются ядрами Вольтерра, являются переходными характеристиками динамической системы и подлежат идентификации.

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 - нелинейная система рассматривается как непосредственное обобщение линейного случая, хотя сам объект может существенно отличаться от линейного.

Следует отметить, что на практике оценка ядер Вольтерра, в чем и заключается задача идентификации, чрезвычайно трудоемкая, а порой практически неразрешимая. Эту задачу решил Винер, показав, что если на вход системы подается определенный, специально выбранный сигнал в виде гауссовского белого шума, то простое преобразование ряда Вольтерра приводит к ряду с взаимно ортогональными членами, что позволяет относительно легко определять ядра системы [4]. 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 в процессе работы.

Адекватная модель обычно обладает той или иной побочной адекватностью, т.е. она дает правильное качественное и количественное описание не только характеристик, для которых 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 данного 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. – Ярославль: Верхне-Волж. кн. из-во, 1984.
2. **Эйкхофф, П.** Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975.
3. **Касты, Дж.** Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касты. – М.: Мир, 1982.
4. **Ку, И.Х.** Техническая кибернетика за рубежом / И.Х. Ку, А.А. Вольф. – М.: Машиностроение, 1968.

УДК 621.52

А.А. Башев

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Объект исследования - следящая система с фазовым управлением двухфазным асинхронным двигателем. Рассмотрены вопросы устойчивости системы в малом и синхронизма.

A tracking system with phase control of a two-phase asynchronous motor is considered. The problems of stability of the system in small and synchronism mode are considered.

Ключевые слова: следящая система, фазовое управление, устойчивость, полоса синхронизма

Key words: the servo system, the phase control, resistance, stripe matching.

Системы с фазовым управлением находят самое широкое применение в различных областях техники. К ним относятся системы ФАПЧ – разновидность системы автоматической подстройки частоты стабилизируемого генератора, они также применяются для создания высокостабильных возбуждателей с дискретным множеством частот, для создания фазовых модуляторов и детекторов, используются в качестве высокоэффективных узкополосных фильтров, а также в устройствах для деления и умножения частоты и т.п. Они применяются в автоматике и приводе, в системах точной магнитной записи для стабилизации скорости вращения ведущего вала.

В данной работе рассматривается следящая система с фазовым управлением асинхронным двухфазным двигателем АД при питании его обмоток от генератора напряжения, когда в тракте переменного тока включено корректирующее устройство [1]. Она состоит из сравнивающего элемента (фазовый модулятор), выполненного на двух СКВТ (датчика и приемника), работающих в режиме фазовращателя, корректирующего устройства и исполнительного двигателя (фазовый детектор) с редуктором. Модель фазового модулятора это нелинейное устройство с нелинейной синусоидальной характеристикой, на вход которого поступает сигнал рассогласования φ и опорное колебание частоты ω , так, что на выходе его получается фазомодулированный сигнал.

Функциональная схема системы представлена на рис. 1. Ее уравнение в изображениях [1], [2], [5]

$$\varphi + \Phi(p)[K'(p)L\{\sin\varphi\} + K''(p)L\{\cos\varphi\}] = \theta_1, \quad (1)$$

где $\varphi = \theta_1 - \theta_2$ - угол рассогласования между осью датчика и приемника;
 $\Phi(p) = \frac{1}{p(T_3 p + 1)}$ - передаточная функция двигателя; $K'(p) = Re_j K(p + j\omega)$ и $K''(p) = Im_j K(p + j\omega)$ - реальная и мнимая части комплексной передаточной функции корректирующего звена соответственно.

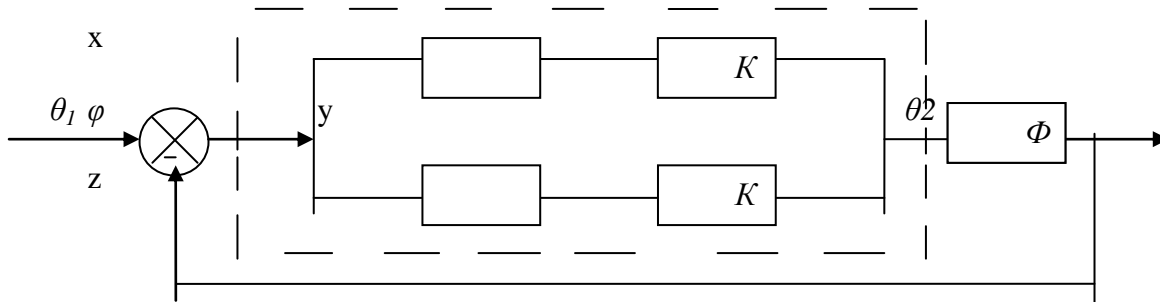


Рис. 1. Функциональная схема следящей системы с фазовым управлением двухфазным АД

Будем рассматривать систему с корректирующим звеном $K(p) = Tp$ в цепи переменного тока, тогда реальная и мнимая части комплексной передаточной функции будут:

$$K^I(p) = Tp \quad \text{и} \quad K^{II}(p) = T\omega_0. \quad (2)$$

Подставляя (2) в уравнение (1), получим во временной области уравнение

$$T_3 \ddot{\varphi} + \dot{\varphi} - K_0 T \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} + K_0 T \omega_0 \sin \varphi = T_3 \ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1. \quad (3)$$

Исследовать систему будем при входном сигнале $\theta_1(t) = kt$, тогда уравнение (3) примет вид

$$T_3 \ddot{\varphi} + \dot{\varphi} - K_0 T \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} + K_0 T \omega_0 \sin \varphi = k. \quad (4)$$

Рассмотрим установившийся режим и устойчивость в «малом». В установившемся режиме $\ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$ и $\varphi_y(t)$ определяется согласно (4) из равенства

$$\sin \varphi_y = \frac{k}{K_0 T \omega_0}. \quad (5)$$

Откуда

$$\varphi_y = \arcsin \frac{k}{K_0 T \omega_0} . \quad (6)$$

Исследование устойчивости в малом позволяет определить полосу синхронизма системы, т.е. область значений k , при которых возможен устойчивый режим слежения. Система будет устойчива, если с течением времени любое достаточно малое отклонение от положения равновесия, вызванное внешней причиной, стремится к нулю, т.е. при условии асимптотической устойчивости в малом режиме синхронизма.

Предположим, что в некоторый момент в системе величина $\varphi(t)$ отклонилась от φ_y на $\Delta\varphi$, т.е. $\varphi(t) = \varphi_y + \Delta\varphi$. Подставляя это значение $\varphi(t)$ в (2) и учитывая, что $p^{(i)}\varphi_y = 0$ ($p = \frac{d}{dt}$) получаем

$$T_3 p^2 \Delta\varphi + p\Delta\varphi - K_0 T \sin(\varphi_y + \Delta\varphi) p\Delta\varphi + K_0 T \omega_0 \sin(\varphi_y + \Delta\varphi) = k . \quad (7)$$

Разложим функции $\sin(\varphi_y + \Delta\varphi)$ в ряд Тейлора:

$$\sin(\varphi_y + \Delta\varphi) = \sin \varphi_y + \frac{\cos \varphi_y}{1!} \cdot \Delta\varphi - \dots \quad (8)$$

Так как $\Delta\varphi$ величина малая, ограничимся двумя первыми членами ряда (8).

Подставляя (8) в (7) и учитывая (5), получим уравнение

$$T_3 p^2 \Delta\varphi + p\Delta\varphi - K_0 T \sin \varphi_y p\Delta\varphi + K_0 T \omega_0 \cos \varphi_y \Delta\varphi = 0. \quad (9)$$

Для исследования устойчивости решения этого уравнения воспользуемся критерием Рауса-Гурвица. Это условие применительно к уравнению (9) имеет вид

$$K_0 T \omega_0 \cdot \cos \varphi_y > 0. \quad (10)$$

Отсюда можно увидеть, что полоса синхронизма системы может быть сколь угодно большой. Однако следует заметить, что исходное уравнение было получено при ограничениях на полосу пропускания и спектры сигналов и условие устойчивости в малом справедливо при их выполнении.

Фазовая следящая система имеет несколько режимов работы. Если выходной сигнал системы повторяет входной сигнал, то такой режим называется режимом синхронизма. С понятием режима синхронизма связано понятие полосы синхронизма, т.е. области некоторых параметров входных сигналов, при которых возможен режим синхронизма.

Второе состояние системы – режим биений - наблюдается в тех случаях, когда коэффициент k во входном сигнале превышает общий коэффициент усиления систем K_0 . Переходное состояние, при котором режим биений переходит в режим синхронизма, называется режимом захвата. Полоса захвата - это об-

ласть параметров входных сигналов, в которой при любых начальных условиях устанавливается режим синхронизма.

Задача определения полосы захвата связана с переходом от устойчивого предельного цикла, соответствующего режиму биений, к неустойчивому, являющемуся границей областей начальных значений, начиная с которых система приходит к определенному выше стационарному режиму.

Фазовым пространством рассматриваемой системы является поверхность кругового цилиндра [6] с осью, параллельной производной от φ и $\dot{\varphi}$ по горизонтали. Качественное уравнения системы позволяет разделить пространство параметров системы на области качественно различных режимов работы. На фазовой поверхности существуют два типа предельных циклов: первого рода, охватывающие состояния равновесия, и второго рода, охватывающие цилиндр. Устойчивое состояние равновесия – это стационарный режим работы при постоянной разности фаз (режим синхронизма). Устойчивый предельный цикл I рода – это стационарный режим биений в системе около постоянной разности фаз (режим биений I рода). Устойчивый предельный цикл II рода (вокруг цилиндра) – это стационарный режим биений в системе, при котором происходит периодическое повторение некоторой разности колебаний при неограниченно увеличивающейся разности фаз. Сепаратрисы седел разделяют на фазовой поверхности области существования и расположения областей начальных значений, позволяющих установить появление и существование периодических стационарных режимов [6], [7].

Библиографический список

1. Сапфиров, С.Г. Электромеханика / С.Г. Сапфиров [и др.] // Изв. вузов. – 1970. – №10.
2. Башев, А.А. Операторы и ядра Вольтерра одной нелинейной системы / А.А. Башев // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. Всеросс. научно-технич. конф. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. – С. 44-48.
3. Башев, А.А. Синтез корректирующих звеньев фазовой системы управления / А.А. Башев, Б.Ю. Алтунин // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 117-123.
4. Ивей, К.А. Системы автоматического регулирования на несущей переменного тока / К.А. Ивей. – М.: Машиностроение, 1968.
5. Власов, Н.П. Теория линейных следящих систем работающих на переменном токе / Н.П. Власов. – М.: Энергия, 1964.
6. Власов, Н.П. Автоколебания синхронного мотора / Н.П. Власов // Ученые записки ГГУ им.Н.И. Лобачевского, 1939. – Вып.12
7. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Физматгиз, 1959.

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.313.323

А.И. Байков, А.Б. Дарьенков, А.А. Куркин, Е.Н. Соснина

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ПРИЛИВНОГО АГРЕГАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся результаты разработки математических моделей для анализа энергетических показателей приливной электростанции со вспомогательными дизель-электрическими ветровым агрегатами при различных исполнениях силовой электрической части на основе силовых электронных преобразователей параметров электроэнергии, имеющих микропроцессорную систему управления. Анализ статических и динамических режимов работы электростанции в целом и ее отдельных структур на основе компьютерного моделирования детерминированных и случайных процессов функционирования позволяет получить необходимую информацию для выбора технических решений при разработке энергоэффективных локальных систем электроснабжения.

The results of the development of mathematical models for the analysis of the power indices of a tidal power station with auxiliary diesel-electric wind aggregates under various designs of a power electrical part based on power electronic converters of electric power parameters having a microprocessor control system are given. The analysis of static and dynamic modes of operation of a power plant and its separate structures on the basis of computer modeling of deterministic and random processes of functioning makes it possible to obtain the necessary information for the selection of technical solutions for the development of energy efficient local power supply systems.

Ключевые слова: математическое моделирование, приливная электростанция, дизель-генератор, ветроэнергетический агрегат, синхронная машина, силовой электронный преобразователь, энергетические показатели.

Key words: mathematical modeling, tidal power station, diesel generator, wind power unit, synchronous machine, power electronic converter, power indicators.

Введение

Развитие мировой энергетики в XXI в. предполагает активное использование возобновляемых видов энергии: механической энергии ветра и потоков воды, тепловой и лучистой энергии солнечного излучения, тепла Земли, химической энергии, заключенной в биомассе [1, 2]. В отличие от источников на основе минерального топлива и делящихся веществ, они практически неисчерпаемы и в то же время не связаны с дорогостоящими разведкой, добычей, транспортировкой и хранением, экологически чисты. Они пока уступают тра-

диционными источникам по стоимости и масштабам производства, но по мере развития эта разница неуклонно снижается [3, 4].

Морские энергоресурсы [5] имеют огромные запасы энергии – поглощенного водой солнечного излучения, кинетической энергии морских волн [6, 7], течений, приливов [8] и прибоев. Уже в настоящее время находятся сферы их экономически выгодного применения – при замене дизель - генераторов, обеспечивающих электроэнергией автономных потребителей на островах, вдоль удаленной береговой зоны и т. п. Несмотря на безграничные потенциальные энергоресурсы морей и океанов, эти технологии до сих пор не получили широкого распространения. Их более интенсивному применению препятствуют большие капитальные затраты, прерывистый и случайный характер генерации энергии [9, 10, 11]. Поэтому волновые, приливные и другие морские электростанции подключаются к централизованным электрическим сетям [12], либо (в случае автономной работы), параллельно с ними функционируют аккумуляторные батареи [13] или агрегаты на основе других источников возобновляемой энергии, обычно ветровые и солнечные [14, 15].

Применение таких комплексов требует решения широкого круга теоретических и практических задач, связанных как с совершенствованием агрегатов преобразования энергии [16, 17, 18], так и улучшением технико-экономических показателей остального энергетического оборудования. В частности, переменный характер частот и уровней напряжения вырабатываемой электроэнергии обуславливает необходимость согласования ее параметров на основе использования силовых электронных преобразователей. А они, в свою очередь, могут ухудшать гармонический состав токов и напряжений [19, 20]. Математическое моделирование таких систем обеспечивает возможность анализа энергетических и других технико-экономических показателей. Это необходимо для выработки технических решений как по структурам электростанций, так и выбору параметров отдельных узлов и элементов силовой части и управления. По этой теме авторами были изложены результаты разработки среды математического моделирования ветро - дизельной электростанции [21], которые в настоящей статье дополняются представлениями приливного агрегата с воспроизведением различных режимов работы и эффективными методами анализа.

Расчетная схема

Для анализа разнообразных электромеханических и электромагнитных процессов в автономных электростанциях принята структурная схема (рис. 1), включающая три канала генерации энергии - дизельного d , ветрового w и приливного t , эквивалентной активно-индуктивной трехфазной нагрузки l , резервного источника на аккумуляторной батарее Ac и общей шины постоянного тока dc . Источники энергии – дизель D , ветроколесо W и приливной агрегат T вращают валы генераторов с частотами ω_d , ω_w , ω_t , развивая моменты h_d , h_w , h_t . В качестве электромеханических преобразователей энергии используются (как вариант) синхронные генераторы с постоянными магнитами M_d , M_w и M_t - с управляемым возбудителем V_T . Трехфазные токи статоров генераторов I_{sd} , I_{sw} , I_{st}

преобразуются в постоянные управляемыми и неуправляемыми выпрямителями V_d , V_w , V_t . В зависимости от ситуации с потребностью нагрузки, скоростью ветра и параметрами приливного канала оператор выключателями Q_d , Q_w , Q_t , Q_l , Q_{ac} коммутирует различные схемы работы электростанции.

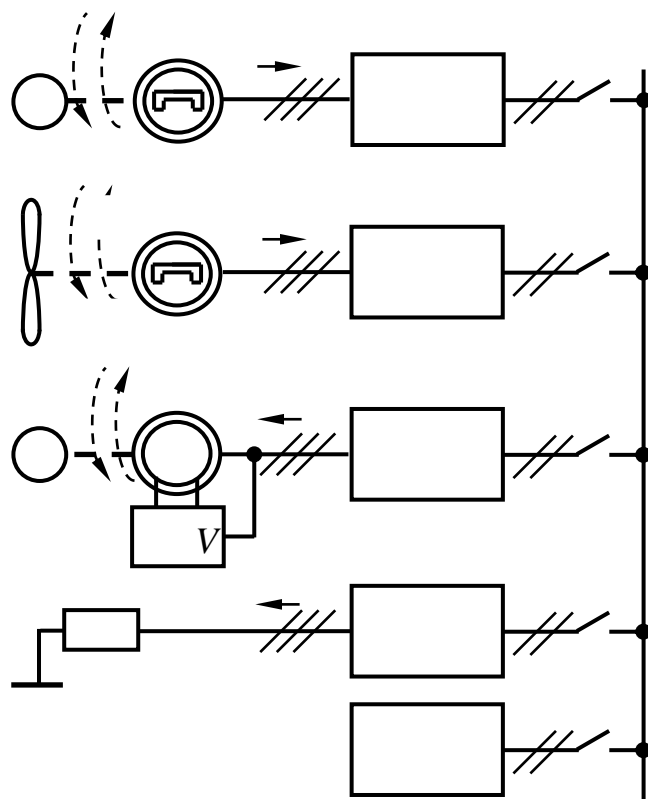


Рис. 1. Структурная схема автономной электростанции:

D , W , T – дизель, ветроколесо, турбина; M_d , M_w , M_t – генераторы и V_d , V_w , V_t – выпрямители дизель-генераторного, ветрового и приливного каналов; V_T – управляемый выпрямитель возбуждения синхронного генератора M_t ; A_{ib} , Z_l – автономный инвертор напряжения и эквивалентный импеданс цепи нагрузки; A_c – аккумуляторная батарея; Q – выключатели; dc – шина постоянного тока

Приливной канал, являющийся основным и самым мощным (например, мощностью 400 кВт, как у Вислогубской приливной электростанции [5]), предусматривает работу в различных турбинных и насосных режимах. С точки зрения обобщения интерес представляет прямой насосный режим приливного агрегата, при котором он в качестве асинхронного двигателя приводит в движение насос, закачивающий воду из моря в бассейн, запасая энергию. Если допустить, что в это время потребление составляет 100 кВт, а мощность ветроканала 200 кВт, то мощность потребления приливным каналом составит 100 кВт. Преобразователь приливного канала при этом работает в режиме автономного инвертора напряжения. Расчетная схема воспроизведения процессов в силовой схеме при такой ситуации (рис. 2) предусматривает использование математических моделей синхронного генератора, асинхронного двигателя, выпрямите-

ля и автономного инвертора напряжения, т.е. достаточно широкий набор моделей объектов.

Для анализа энергетических показателей схемы представляется возможным упрощенное представление силовых электронных схем как идеальных преобразователей напряжения трехфазного переменного в постоянное и обратно [22]. Оценку влияния процессов коммутации вентилях на формы токов и напряжений целесообразно выделить в отдельную задачу и проводить в частных расчетных схемах меньшего размера. Поэтому оказывается возможным описание функционирования сложных многоконтурных схем с ключевыми элементами простыми узлами на базе зависимых источников тока и напряжения V_w , AI_p , AI_l .

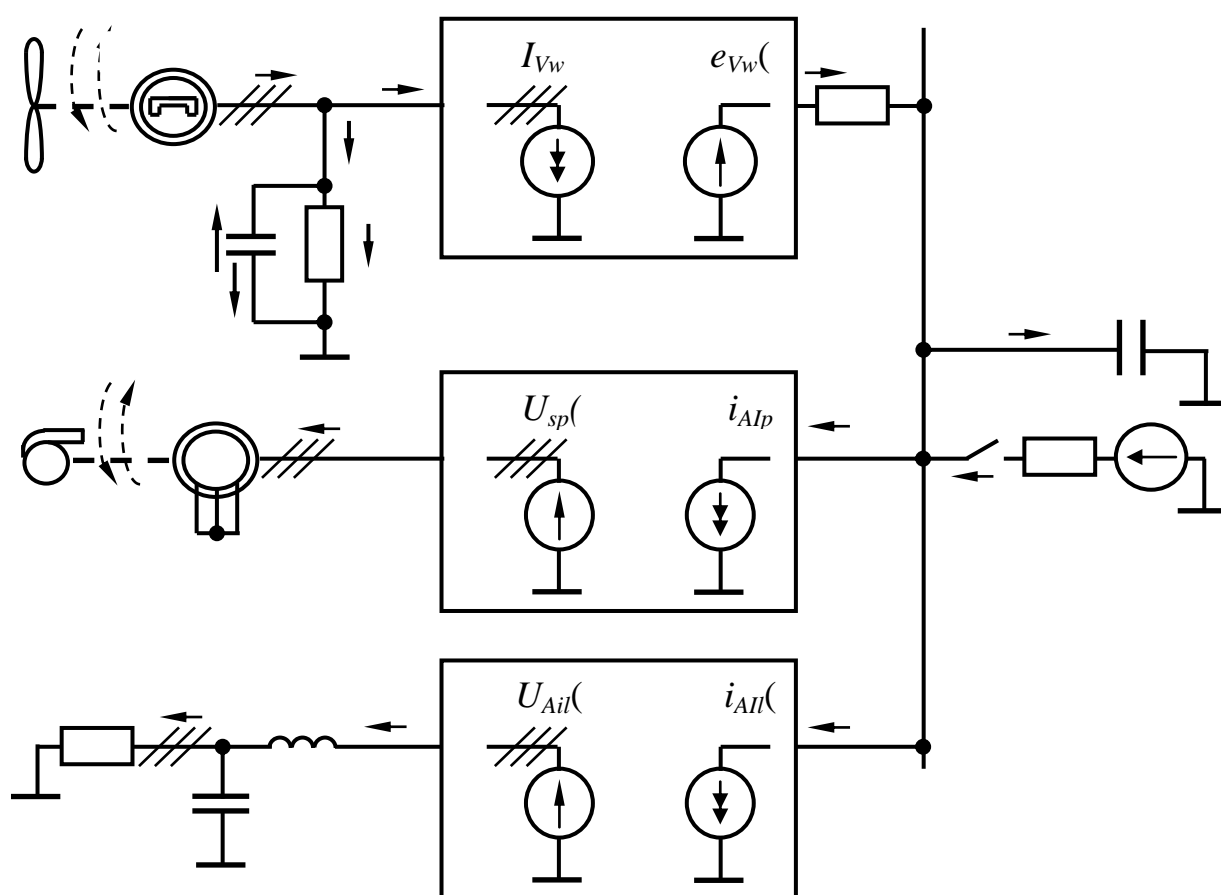


Рис. 2. Расчетная схема автономной электростанции при питании от ветроканала нагрузки и приливного агрегата, работающего в режиме прямого насоса:

W, P – ветроколесо и насос; M_w, V_w – синхронный генератор с постоянными магнитами и выпрямитель ветроканала; M_p – машина приливного канала, работающая в режиме асинхронного двигателя; AI_p, AI_l – автономные инверторы напряжения приливного канала и цепи нагрузки; Z_l – эквивалентный импеданс цепи нагрузки; r_{xw}, r_{Vw}, c_{xw} – активные сопротивления и емкости цепей связи; l_{fl}, c_{fl} – индуктивность и емкость фильтра нагрузки; Q_{ac}, r_{ac}, e_{ac} – выключатель, активное сопротивление и ЭДС аккумуляторной батареи; dc – шина постоянного тока с емкостью c_{dc}

Моделирование электронных преобразователей

В цепи ветроканала неуправляемый выпрямитель V_w осуществляет коммутацию вентилях по шести участкам на периоде ЭДС генератора M_w в соответствии со значениями линейных напряжений, выполняя функциональное преобразование напряжений емкостей U_{cxw} на входе выпрямителя в пульсирующее напряжение питания цепи постоянного тока:

$$e_{Vw} = [X_V U_{cxw}]_{j_{\max}}, \quad X_V = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где X_V - топологическая матрица, обеспечивающая вычисление линейных напряжений на выходе трехфазного мостового выпрямителя; j_{\max} - номер строки, соответствующей максимальному значению вектора $X_V U_{cxw}$. Емкости C_{xw} соответствуют либо конденсаторам фильтра, если он имеется в реальной схеме, либо специально вводимым емкостям цепи связи статора машины и подключенной внешней схемы. В обоих случаях им в параллель включается сопротивление связи r_{xw} большой величины, согласующее цепи статора машины и входной цепи выпрямителя путем определения соотношения между токами:

$$I_{cxw} = I_{sw} - I_{Vw} - r_{xw}^{-1} U_{cxw}. \quad (2)$$

Вектор токов статора генератора I_{Vw} , принимается зависимым от выходного тока выпрямителя и определяется путем аналогичного функционального преобразования

$$I_{Vw} = [X_V i_{Vw}]_{j_{\max}} \quad (3)$$

на основе выбора строки j_{\max} из вектора $X_V i_{Vw}$. В свою очередь, на выход выпрямителя включается сопротивление r_{Vw} малой величины, благодаря чему согласуются цепи выпрямителя V_w и постоянного тока dc :

$$i_{Vw} = r_{Vw}^{-1} (e_{Vw} - u_{cdc}). \quad (4)$$

Емкость c_{dc} может присутствовать в схеме как элемент фильтра, либо ее с малым значением параметра следует включить искусственно.

Потребляемые входные токи i_{Alp} , i_{All} блоков автономных инверторов насоса приливного агрегата и эквивалентной нагрузки определяются зависимыми от токов I_{sp} и I_{fl} статора M_p и индуктивности фильтра цепи нагрузки:

$$\begin{aligned} i_{AIp} &= \text{diag}[x_{p1} \quad x_{p3} \quad x_{p5}]I_{sp}, \\ i_{AIl} &= \text{diag}[x_{l1} \quad x_{l3} \quad x_{l5}]I_{fl} \end{aligned} \quad (5)$$

где диагональная матрица составляется из значений функций управления транзисторов нечетной или четной групп трехфазной мостовой схемы. Полагается, что при наличии импульса управления значение соответствующей функции единица, иначе ноль. Определение этих функций производится по известному алгоритму векторного управления на основе принципа широтно-импульсной модуляции.

Согласно закону частотного управления амплитуды составляющих вектора напряжений U_{AIp} на статоре машины Mp , работающей в режиме асинхронного двигателя, зависят от частоты f_{sp} формируемого напряжения

$$u_{AIp} = \sqrt{2} \frac{u_{snomp} f_{sp}}{f_{snom}} = \frac{u_{s \max p} f_{sp}}{f_{snom}}, \quad (6)$$

где u_{snom}, f_{snom} – номинальные действующее значение и частота фазного напряжения машины. Аналогично через частоту напряжения нагрузки f_l находится амплитуда вектора напряжения

$$u_{AIl} = \sqrt{2} \frac{u_{noml} f_l}{f_{lnom}} = \frac{u_{maxl} f_l}{f_{lnom}}. \quad (7)$$

Вращение векторов U_{Aip} и U_{Ail} с соответствующими угловыми частотами ω_p и ω_l происходит по шести секторам. Положение формируемого вектора длиной u_{Aij} ($j=p, l$) определяется в пределах текущего сектора k_{sect} углом φ_j (рис. 3). Этот угол вычисляется в дискретные моменты времени t_n , отсчитываемые в единицах измерения времени моделирования и совпадающие с тактами dt_{tact} модуляции:

$$\varphi_j = \frac{2\pi\omega_j(t_n - t_{nTj})}{T_j} - (k_{sect} - 1)\frac{\pi}{3}, \quad (8)$$

где t_{nTj} – момент времени, соответствующий началу воспроизводимого периода T_j напряжения частоты f_j .

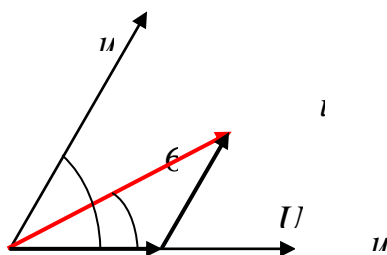


Рис.3. Формирование текущего положения вектора напряжения

Отношения длин образующих векторов $u_{x,j}$ и $u_{x1,j}$ к длинам базового вектора

$$u_{Bj} = \frac{2}{3}u_{\max j} = \frac{2}{3}u_{x,j} = \frac{2}{3}u_{x1,j} \quad (9)$$

определяет скважности:

$$\gamma_{x,j} = \frac{u_j}{u_{Bj}} \frac{(\cos \varphi_j - \sin \varphi_j)}{\sqrt{3}}, \gamma_{x+1,j} = \frac{u_j}{u_{Bj}} \frac{2 \sin \varphi_j}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

По ним с применением операции округления рассчитываются числа тактов $k_{x,j}$, $k_{x1,j}$ и $k_{0,j}$, приходящиеся на эти вектора и на нулевой интервал в пределах периода модуляции ШИМ T_{shim} , состоящего из целого числа тактов

$$k_{x,j} = \text{round} \left(\frac{\gamma_{x,j} T_{shim}}{dt_{tact}} \right), k_{x+1,j} = \text{round} \left(\frac{\gamma_{x+1,j} T_{shim}}{dt_{tact}} \right), k_{0,j} = \frac{T_{shim}}{dt_{tact}} - k_{x,j} - k_{x1,j}. \quad (11)$$

Образующие вектора формируются комбинациями открытых и закрытых транзисторов, совпадающими с комбинациями импульсов управления X_j согласно табл. 1.

Таблица 1

Формирование импульсов управления по интервалам секторов

k_{sect}	импульсы вектора	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	X	1	0	0	1	0	1
	X_1	1	0	1	0	0	1
	X_0	1	0	1	0	1	0
2	X	1	0	1	0	0	1
	X_1	0	1	1	0	0	1
	X_0	0	1	0	1	0	1
3	X	0	1	1	0	0	1
	X_1	0	1	1	0	1	0
	X_0	1	0	1	0	1	0
4	X	0	1	1	0	1	0
	X_1	0	1	0	1	1	0
	X_0	0	1	0	1	0	1
5	X	0	1	0	1	1	0
	X_1	1	0	0	1	1	0
	X_0	1	0	1	0	1	0
6	X	1	0	0	1	1	0
	X_1	1	0	0	1	0	1
	X_0	0	1	0	1	0	1

На очередном шаге расчета, после определения сектора, периода ШИМ и интервала внутри него, устанавливаются векторы X_j импульсов управления, ко-

торые уже использовались в (5) для вычисления входных токов инверторов. Они же применяются для расчета трехфазных напряжений на выходе инвертора приливного агрегата:

$$\begin{aligned}
 U_{sp} &= 0, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 0, \\
 U_{sp} &= 0, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 3, \\
 U_{sp} &= \left(-\text{diag}(x_1 \ x_3 \ x_5) + \frac{2}{3} \right) u_{cdc}, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 1, \\
 U_{sp} &= \left(\text{diag}(x_2 \ x_4 \ x_6) - \frac{2}{3} \right) u_{cdc}, \text{ если } x_2 + x_4 + x_6 = 2,
 \end{aligned} \tag{12}$$

где используются значения функций управления ключей анализируемого инвертора, и в случае канала нагрузки индексы векторов напряжений меняются с sp на AI .

Важным достоинством описанного алгоритма моделирования векторного управления автономными инверторами напряжения является быстроедействие, не исключающее учет дискретности не только по частоте модуляции ШИМ, но и по тактовой частоте.

Анализ переходных процессов

Функционирование электромеханических процессов в схеме (рис. 2) описывается на основе применения координатных преобразований Парка - Горева [23]. Уравнения состояния ветроканала при пренебрежении влиянием компенсационных контуров в статических режимах

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \psi_{dw} &= -\omega_{rw} \psi_{qw} - r_{sw} i_{dw} - u_{dcxw}, \\
 \frac{d}{dt} \psi_{qw} &= \omega_{rw} (\psi_{dw} + \psi_{fw}) - r_{sw} i_{qw} - u_{qcw}, \\
 \frac{d}{dt} \omega_{rw} &= j_w^{-1} (h_w - h_{emw}), \\
 \frac{d}{dt} \theta_{rw} &= \omega_w, \\
 \frac{d}{dt} U_{cxw} &= c_{xw}^{-1} I_{cxw}
 \end{aligned} \tag{13}$$

имеют в качестве независимых переменных: ψ_{dw} , и ψ_{qw} – потокосцепления двухфазной эквивалентной машины по продольной и поперечной осям; ω_w и θ_w – частота вращения и угол поворота ротора; U_{cxw} – вектор напряжений емкостей цепи связи. Потокосцепление постоянного магнита ротора ψ_{fp} является пара-

метром. Правые части уравнения (13) рассчитываются с использованием соотношений:

$$\begin{aligned}
 I_{dqw} &= \begin{bmatrix} l_{dw}^{-1} & 0 \\ 0 & l_{qw}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{dw} \\ \Psi_{qw} \end{bmatrix}, U_{dqxw} = \begin{bmatrix} u_{dxw} \\ u_{qxw} \end{bmatrix} = A_{dqw} \begin{bmatrix} U_{cxw.1} \\ U_{cxw.2} \end{bmatrix}, \\
 h_{emw} &= 1,5i_{qw} \Psi_{fw} \\
 I_{sw} &= A_{dqw}^{-1} I_{dqw}, I_{xw} = I_{sw} - I_{Vw}, I_{rxw} = r_{xw}^{-1} U_{cxw}, I_{cxw} = I_{xw} - I_{rxw}, \\
 A_{dqw} &= 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{rw} + \pi/3) & \sin(\theta_{rw}) \\ \cos(\theta_{rw} + \pi/3) & \cos(\theta_{rw}) \end{bmatrix},
 \end{aligned} \tag{14}$$

где l_{dw} , l_{qw} , r_{sw} - индуктивности статора машины M_w по продольной и поперечной осям и активное сопротивление обмотки статора; j_w - момент инерции ветроагрегата.

Аналогичное уравнение было бы у генератора M_p канала приливного агрегата в турбинном режиме. В режиме же асинхронного двигателя, приводящего насос, его уравнение состояния имеет вид

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \Psi_{dqsp} &= U_{dqsp} + \omega_{sp} B \Psi_{dqsp} - r_{sp} I_{dqsp}, \\
 \frac{d}{dt} \Psi_{dqrp} &= (\omega_{sp} - \omega_{rp}) B \Psi_{dqrp} - r_{rp} I_{dqrp}, \\
 \frac{d\omega_{rp}}{dt} &= j_{rp}^{-1} (h_{emp} - h_p), \\
 \frac{d\theta_{rp}}{dt} &= \omega_{rp},
 \end{aligned} \tag{15}$$

где Ψ_{dqsp} , и Ψ_{dqrp} - потокосцепления статора и ротора двухфазной эквивалентной машины M_p по продольной и поперечной осям; ω_p и θ_p - частота вращения и угол поворота ротора. Правые части уравнения (15) рассчитываются с использованием (12) и соотношений:

$$\begin{aligned}
 A_{dqsp} &= 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{sp} + \pi/3) & \sin(\theta_{sp}) \\ \cos(\theta_{sp} + \pi/3) & \cos(\theta_{sp}) \end{bmatrix}, \theta_{sp} = \omega_{sp} t, B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \\
 U_{dqsp} &= A_{dqsp} \begin{bmatrix} u_{sp.1} \\ u_{sp.2} \end{bmatrix}, I_{dqsrp} = L_{srp}^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{dqsp} \\ \Psi_{dqrp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dqsp} \\ I_{dqrp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dsp} \\ i_{qsp} \\ i_{drp} \\ i_{qrp} \end{bmatrix}, L_{srp} = \begin{bmatrix} l_{sp} & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_{sp} & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_{rp} & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_{rp} \end{bmatrix},
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$h_{emp} = l_m (i_{qsp} i_{drp} - i_{dsp} i_{qrp}), I_{sp} = H_1^{-1} A_{dqsp}^{-1} I_{dqsp},$$

где $l_{sp}, l_{rp}, r_{sp}, r_{rp}$ - индуктивности и активные сопротивления обмоток статора и ротора машины M_p в режиме работы асинхронным двигателем; j_p - момент инерции приливного агрегата.

Уравнение состояния трехфазной эквивалентной активно - индуктивной нагрузки $r_l - l_l$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{hl} &= L_{hl}^{-1} (U_{hcfl} - R_{hl} I_{hl}), \\ \frac{d}{dt} I_{All} &= l_{fl}^{-1} (U_{All} - U_{hcfl} - r_{fl} I_{All}), \\ \frac{d}{dt} U_{cfl} &= c_{fl}^{-1} (I_l - I_{All}) \end{aligned} \quad (17)$$

имеет в качестве независимых переменных контурные токи I_{hl} цепи нагрузки, токи I_{fl} индуктивностей и напряжения емкостей U_{cfl} фильтра, имеющего параметры l_{fl}, r_{fl}, c_{fl} . Правые части (17) рассчитываются с учетом (12) и соотношений:

$$\begin{aligned} U_{chl} &= H_1 U_{cfl_{load}}, I_l = H'_1 I_{hl}, H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \\ L_{hl} &= H_1 \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} H'_1, R_{hl} = H_1 \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} H'_1. \end{aligned} \quad (18)$$

Шина постоянного тока, связывающая каналы схемы, имеет, как минимум, один инерциальный параметр – емкость c_{dc} , которой может являться реальная конденсаторная батарея фильтра, или же искусственно введенная малая емкость связи. Уравнение состояния напряжения этой емкости выражается с использованием результатов расчета ЭДС питания на выходе ветроканала (1) и токов, потребляемых каналом насоса приливного агрегата и эквивалентной нагрузки (5):

$$\frac{du_{cdc}}{dt} = c_{dc}^{-1} (r_{Vw}^{-1} (e_{Vw} - u_{cdc}) - i_{Alp} - i_{All}). \quad (19)$$

Анализ энергетических показателей

Важным этапом анализа эффективности принимаемых технических решений является определение интегральных показателей качества функционирования устройств. Для анализа важнейших из них – энергетических показателей – предусматривается гармонический анализ кривых функций F фазных токов I_j и напряжения U_j . При воспроизведении соответствующих процессов эти

кривые получаются в виде массивов из значений $F_{j(n)}$ ($n=1,2,\dots,N_{dt}$) на период T с одинаковым шагом dt . Гармонические составляющие фазных токов и напряжений находятся по формулам:

$$F_{A,j(k)} = \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)} \cos\left(k2\pi \frac{1}{T} n \cdot dt\right),$$

$$F_{B,j(k)} = \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)} \sin\left(k2\pi \frac{1}{T} n \cdot dt\right).$$
(20)

В случае симметрии параметров фаз индекс j может опускаться.

Предполагается, что число N_k гармонических составляющих удовлетворяет условию

$$\frac{N_{dt}}{N_k} \geq K_{\min},$$
(21)

где необходимое число точек для определения гармоник $K_{\min}=16-20$.

По составляющим A и B вычисляются амплитуды и фазы гармоник:

$$F_{\max j(k)} = \sqrt{F_{Aj(k)}^2 + F_{Bj(k)}^2},$$

$$\phi_{j(k)} = \arctan \frac{F_{Aj(k)}}{F_{Bj(k)}}.$$
(22)

Действующие значения тока и напряжения вычисляются как среднеквадратичные мгновенных значений при постоянном шаге

$$F_{eff.j} = \sqrt{\frac{1}{N_{dt}} \sum_{n=1}^{N_{dt}} F_{j(n)}^2}.$$
(23)

Полная электрическая мощность, потребляемая или отдаваемая двигателем, находится по эффективным значениям фазных токов и напряжений

$$S_{el} = \sum_{j=1,2,3} I_{eff.j} U_{eff.j}.$$
(24)

Активная и реактивная мощности, потребляемые или отдаваемые СДПМ, находятся по первым гармоническим составляющим фазных токов и напряжений [24]:

$$P_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)} U_{\max j(1)} \cos(\varphi_{Uj(1)} - \varphi_{Ij(1)}),$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)} U_{\max j(1)} \sin(\varphi_{Uj(1)} - \varphi_{Ij(1)}).$$
(25)

Мощность несимметрии появляется в случае пофазного различия параметров нагрузки и находится по формуле

$$Q_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{eff.1} \sqrt{2 \sum_{j=1,2,3} I_{\max j(1)}^2 - \sum_{\substack{g,q=1,2,3 \\ g \neq q}} I_{\max g(1)} I_{\max q(1)} \cos(\varphi_{g(1)} - \varphi_{q(1)})}, \quad (26)$$

где из суммы квадратов амплитуд первых гармоник токов фаз вычитаются все возможные комбинации произведений этих амплитуд на косинусы разностей углов отставаний первых гармоник токов от напряжений.

Мощность искажений, потребляемая или отдаваемая двигателем, находится как квадратичный остаток от полной мощности

$$Q_2 = \sqrt{S_{el}^2 - P_1^2 - Q_1^2 - Q_3^2} \quad . \quad (27)$$

При известных значениях полной мощности, её составляющих, эквивалентном активном сопротивлении нагрузки рассчитываются коэффициенты мощности, сдвига, искажений и полезного действия.

Формулы для определения коэффициентов мощности, сдвига, искажений, несимметрии и полезного действия:

$$k_M = \frac{P_1}{S_{el}}, k_C = \sqrt{\frac{P_1^2}{P_1^2 + Q_1^2}}, k_2 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + Q_2^2}}, \quad (28)$$

$$k_3 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + Q_2^2}}{S_{el}}, \eta = \frac{3r_l I_{eff.1}^2 + h_{emh} \omega_{rp}}{h_{emw} \omega_{rw}}.$$

Результаты количественного анализа

Учет нагрузок агрегатов в реальных эксплуатационных режимах необходим для обеспечения достоверности результатов моделирования и осуществляется с применением аппроксимации имеющихся технических характеристик агрегатов. В частности, для дизель-генераторного канала можно использовать регулировочные характеристики, устанавливающие реализуемое соотношение между моментом на валу и его частотой вращения [21]. Для агрегата приливной электростанции аппроксимируются расходно-напорные характеристики $Q-H$. Например, в режиме прямого насоса у Вислогубской приливной электростанции мощностью 400 кВт [25, рис. 6.1] семейство характеристик притока воды из моря в бассейн представляется формулой

$$Q_P = \sum_{k=1}^4 q_{Pk} H^{k-1}, \quad (29)$$

где для мощности значения коэффициентов $q_p = [-50 \ 35 \ -2 \ -5] \text{ м}^3/\text{с}$ при мощности 400 кВт, а для меньших мощностей $q_{p(1)}$ значения изменяется от -50 до -32 (рис. 4). На основе аппроксимационных зависимостей типа (29) можно программным путем определять нагрузки силовых элементов.

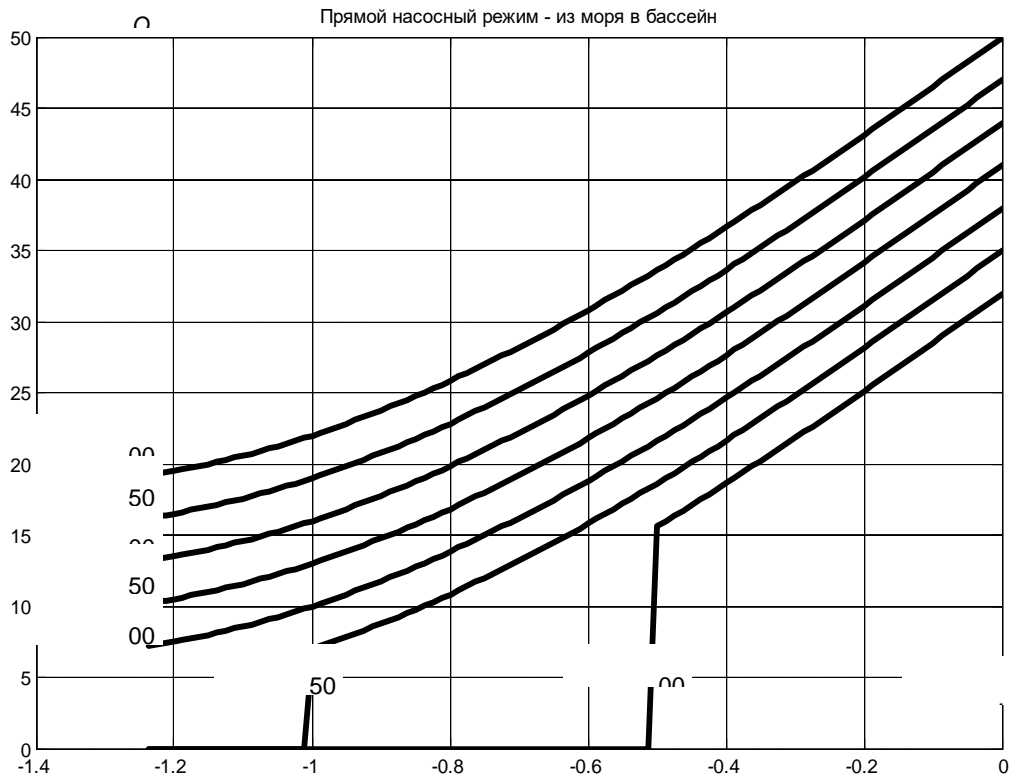


Рис.4. Аппроксимированные расходно-напорные характеристики приливного агрегата Вислогубской ПЭС в режиме прямого насоса

Ранее упоминался режим работы системы с питанием от ветроканала, когда имеющийся избыток мощности 100 кВт используется для закачивания воды в бассейн. Если уровень воды в нем на 0,5 м выше уровня моря, то, согласно характеристикам (рис. 4), будет обеспечена производительность $15 \text{ м}^3/\text{с}$. Для рассматриваемых механизмов характерны кубическая зависимость мощности и квадратичная момента от частоты вращения. Поэтому с использованием известных номинальных значений частоты $\omega_{номр}$, и мощности $P_{ном}$ рассчитываются требуемая синхронная частота вращения $\omega_{ор}$, определяющая параметры AI_p , и соответствующий ей момент h_p на валу насоса для режима с мощностью P_p :

$$\omega_{ор} = \omega_{номр} \sqrt[3]{\frac{P_p}{P_{ном}}} = \omega_{номр} \sqrt[3]{\frac{100}{400}} = 0,63 \omega_{номр} = 0,63 ;$$

$$h_p = \frac{P_p}{P_{ном}} \frac{\omega_{ор}}{\omega_{номр}} = 0,25 \cdot 0,63 = 0,4 ,$$
(30)

где используется представление параметров и физических переменных в относительных единицах. В качестве базисного режима взят номинальный режим нагрузки, по параметрам которого приняты основные базисные величины (табл. 2).

Таблица 2

Параметры базисного режима и основные базисные величины расчетной схемы электростанции

Величина	Обозначение	Формула	Значение	Ед. изм
Активная мощность трехфазной нагрузки	P_l		400	кВт
Коэффициент мощности нагрузки	$\cos\varphi_l$		0,707	
Полная мощность трехфазной нагрузки	S_l	$P_l / \cos\varphi_l$	566	кВА
Угловая частота напряжения	f_1		50	Гц
Действующее значение фазного напряжения	U_l		220	В
Действующее значение фазного тока	I_l	$S_l / (3U_l)$	857	А
Базисное напряжение	U_B	$\sqrt{2} \cdot U_l$	311	В
Базисный ток	I_B	$\sqrt{2} \cdot I_l$	1212	А
Базисная угловая частота	ω_B	$2\pi f_1$	314,1593	1/с
Базисный угол поворота	θ_B		1	

В рассматриваемом примере эквивалентная трехфазная нагрузка 100 кВт реализуется при параметрах:

$$\cos\varphi_l = 0,707; z_l = \frac{3U_{noml}^2 \cos\varphi_l}{P_l R_B} = \frac{3 \cdot 0,707 \cdot 220^2}{100 \cdot 10^3 \cdot 0,257} = 4; \quad (31)$$

$$r_l = z_l \cos\varphi_l = 2,83; l_l = z_l \sin\varphi_l = 2,83.$$

Фильтр, применяемый в цепи нагрузки, приближенно настроен на погашение 5 - 7 гармоник и имеет параметры в относительных единицах $l_{fl} = 0,286$, $c_{fl} = 3,88$. Воспроизведение статического режима при указанных данных дало сочетание показателей (табл. 3), показывающее возможность эффективной реализации этого и других режимов работы комплекса автономной электростанции. На рис. 5 представлены расчетные диаграммы фазных токов и напряжений нагрузок в рассматриваемом статическом режиме. В алгоритме ШИМ применены тактовая частота 18 кГц и частота модуляции 1,8 кГц.

Таблица 3

Интегральные показатели канала нагрузки после фильтра в относительных единицах

$I_{effload}$	$U_{effload}$	$\cos\varphi_{load}$	S_{elload}	$S_{el1load}$	P_{elload}	Q_{1load}	Q_{2load}	k_{mload}	k_{sload}	k_{2load}
0,22	0,7148	0,709	0,4717	0,408	0,289	0,288	0,236	0,614	0,709	0,8655

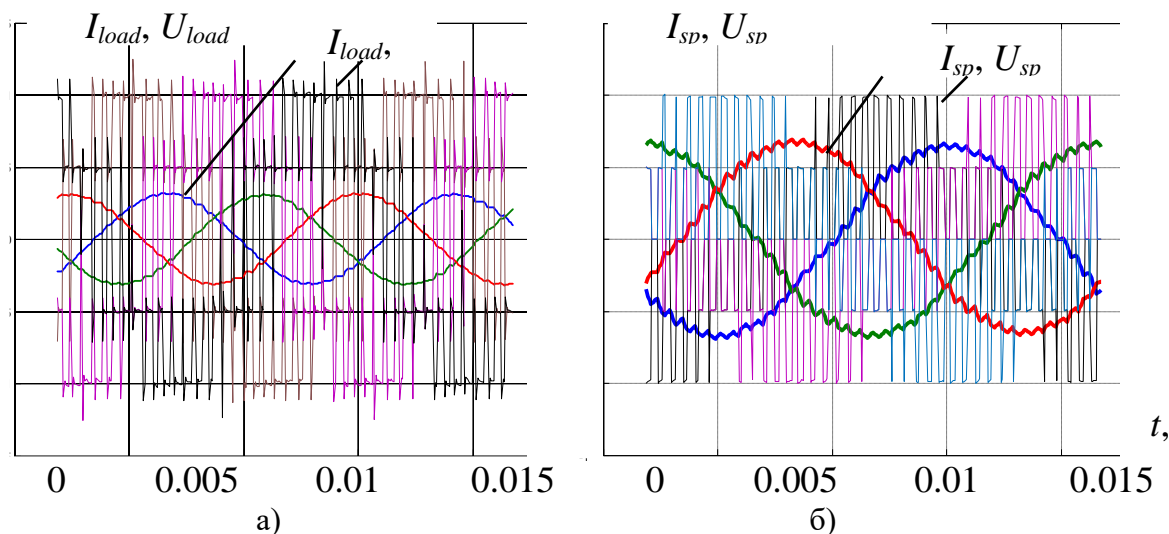


Рис. 5. Расчетные диаграммы токов и напряжений фаз нагрузки перед фильтром (а) и статора машины приливного агрегата в режиме работы двигателем насоса (б)

На рис. 6 приведены спектры гармоник тока и напряжения нагрузки в рассматриваемом режиме:

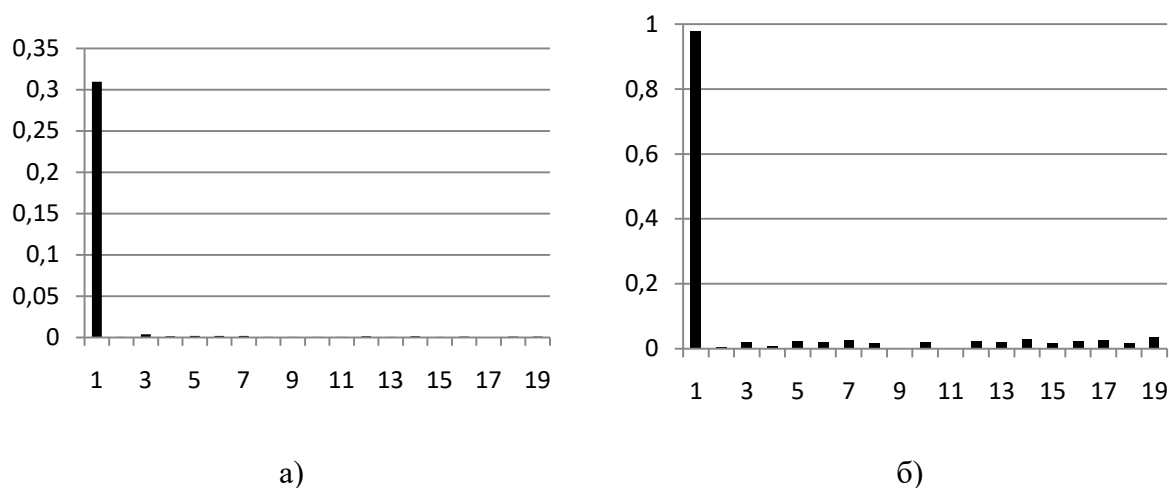


Рис. 6. Расчетные спектры гармоник фазных тока (а) и напряжения (б) нагрузки в статическом режиме в относительных единицах

Выводы

Разработана математическая модель комплекса автономной электростанции, построенной на основе приливного агрегата и использующей другие источники в качестве резервных. Применены эффективные алгоритмы отображения функционирования электромашиных агрегатов в комплекте с силовыми электронными преобразователями параметров электрической энергии.

Показана возможность детального анализа различных режимов работы агрегатов, включая функционирование приливного агрегата турбиной и насосом.

Библиографический список

1. **Twidell, J.** Renewable Energy Resources. Third edition / J. Twidell, T. Weir. - London and New York.: Routledge, 2015. – 784 p.
2. Возобновляемые источники энергии в Российской Федерации и поддержка государства / Е.М. Иванникова [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 17-18. С. 172 - 175.
3. **Ellabbara, O.** Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology / O. Ellabbara, Abu-Rubb, F. Blaabjerg // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. – V.39. – P. 748-764.
4. REN21 . Renewables 2017 Global Status Report in perspective // Renewable Energy Policy Network for the 21st century, 2017. – 43 p.
5. Draft Ocean Energy Strategic Roadmap Building Ocean Energy For Europe: Ocean Energy Forum. – Brussels, Belgium: Technical Report; European Commission, 2015.
6. **Contestabile, P.** Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina / V. Ferrante, D. Vicinanza // Energies. – 2015. – № 8 (12). – P. 14219-14243.
7. **Falnes, J.** A review of wave-energy extraction. Johannes Falnes // Marine Structures. – 2007. – V. 20. – Is. 4. – P. 185-201.
8. Tidal Energy: Technology Brief // IRENA Ocean Energy, 2014. – 34 p.
9. **Gorji-Bandpy, M.** Tidal Energy and Main Resources in the Persian Gulf / M. Gorji-Bandpy, M. Azimi, M. Jouya // Distributed Generation and Alternative Energy Journal. – 2013. – V.82. – №2. – P. 61-77.
10. **Kocaman, A.** A stochastic model for a macroscale hybrid renewable energy system / A. Kocaman [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 54. – P. 688–703.
11. **Li, Y.** Design of a high capacity inter-regional transmission overlay for the US / Li Y, JD McCalley // IEEE Trans Power Syst, – 2015. – № 30 (1). – P. 513–521.
12. **Maheshwari, Z.** Smart Integrated Renewable Energy Systems (SIREs): A Novel Approach for Sustainable Development / Z. Maheshwari, R. Ramakumar // Energies. – 2015. – № 30 (1). – P. 313.
13. Assessment of the Joint Development Potential of Wave and Wind Energy in the South China Sea / Y. Wan [et al.] // Energies. – 2018. – №11(2). – P. 398.
14. Hybrid concentrated solar thermal power systems: A review / Powell K.M. [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 80. P. 215-237.
15. **Renzi, E.** Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean / E. Renzi, F. Dias // European Journal of Mechanics-B/Fluids. – 2013. – № 41. P. 1-10.
16. **Devolder, B.** CFD Simulations of Floating Point Absorber Wave Energy Converter Arrays Subjected to Regular Waves / B. Devolder [et al.] // Energies. – 2018. – № 11 (3). – P. 641.
17. **ShehuSalihu, M.** Power Characteristics Analysis of a Novel Double-Stator Magnetic Geared Permanent Magnet Generator / ShehuSalihu M. [et al.] // Energies. – 2017. – № 10(12). – P. 2048.

18. **Vujacic, M.** Theoretical and Experimental Investigation of Switching Ripple in the DC-Link Voltage of Single-Phase H-Bridge PWM Inverters / M. Vujacic [et al.] // *Energies*. – 2017. – № 10 (8). – P. 1189.
19. **Bierhoff, M.** DC-link harmonics of three-phase voltage source converters influenced by the pulsewidth-modulation strategy / M. H. Bierhoff, F.W. Fuchs // *IEEETrans. Ind. Electron.* – 2008. – № 55. – P. 2085–2092.
20. **Байков, А.Б.** Имитационное моделирование ветро-дизельной электростанции / А.И. Байков, А.Б. Дарьенков, Е.Н. Соснина // *Электротехника*. – 2018. – № 3. С. 26-33.
21. **Saeed Khan, S.** Modeling of MMC for Fast and Accurate Simulation of Electromagnetic Transients: A Review / S.S. Khan, E. Tedeschi // *Energies*. – 2017. №10. – P. 1161.
22. **Горев, А.А.** Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – Л-М.: ГЭИ, 1950. – 552 с.
23. **Маевский, О.А.** Энергетические показатели вентильных преобразователей / О.М. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
24. Приливные электростанции / Л.Б. Бернштейн [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.

УДК 621.337.41

А.Б. Дарьенков, И.Е. Бердников, А.О. Кечкин, А.П. Слuzов, В.В. Соколов

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СО СВОЙСТВАМИ ИСТОЧНИКА МОМЕНТА НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются варианты построения системы электропривода со свойствами источника момента на базе синхронного двигателя с датчиком положения ротора.

In the article considers options for constructing an electrical drive system with the properties of torque source based on synchronous motor with rotor position sensor.

Ключевые слова: датчик положения ротора, векторное управление, электроусилитель руля, бесколлекторный двигатель.

Key words: rotor position sensor, vector control, electric power steering, brushless motor.

В системах электропривода металлорежущих станков, роботов и манипуляторов, грузоподъемных механизмов при изменении скорости требуется поддерживать или ограничивать на допустимом уровне усилие (момент) на валу двигателя. Такая же задача ставится и решается при разработке тягового электропривода передвижного транспортного средства (электромобиль) или электроусилителя руля. Формирование и стабилизация момента (усилия) во всех этих системах электропривода осуществляется построением замкнутого контура момента или, что проще в реализации, построением замкнутого контура тока.

В статье рассматриваются варианты построения системы низковольтного транзисторного электропривода со свойствами источника момента на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе и с синусно-косинусным датчиком положения ротора (ДПР).

Наличие синусно-косинусного датчика положения ротора позволяет точно определить положение вала двигателя относительно статора и реализовать векторное регулирование момента двигателя. Структурные схемы систем электропривода с векторным регулированием момента приведены на рис. 1 и рис. 2.

Используя преобразования Парка – Кларка, реальные токи фаз статора в первом варианте векторной реализации контура момента преобразуются к проекциям в осях d, q во вращающейся системе координат, где сравниваются с заданными значениями. Регуляторы активной и реактивной составляющих тока формируют сигналы управления, которые после обратных координатных и фазных преобразований поступают на управляющие входы транзисторного преобразователя частоты.

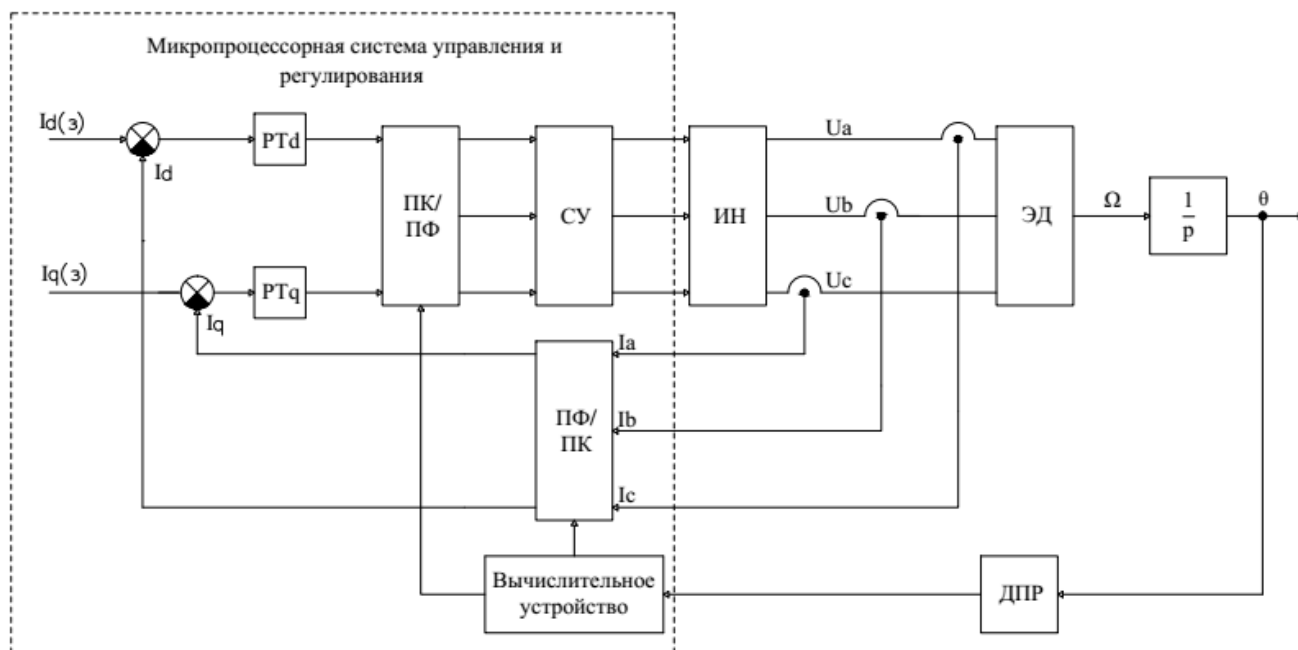


Рис. 1. Структурная схема электропривода с векторным регулированием момента с прямым и обратным координатно-фазным преобразованием

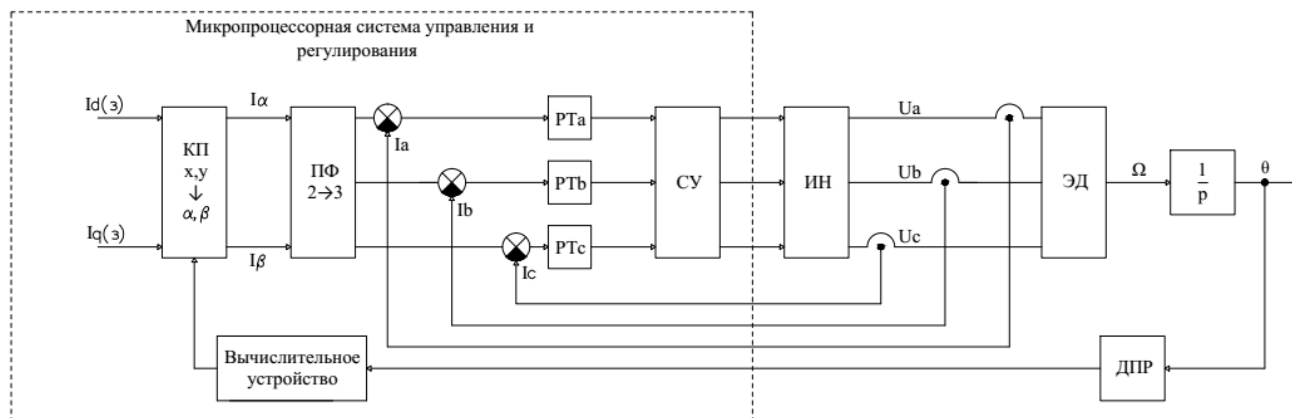


Рис. 2. Структурная схема электропривода с векторным регулированием момента с одним координатно-фазным преобразованием

Во втором варианте с векторным регулированием замыкание контуров фазных токов осуществляется в неподвижной системе координат. Сигнал датчика положения ротора используется для преобразования проекций статорного тока из вращающейся со скоростью поля статора системы координат d, q в неподвижную α, β .

Учитывая, что синхронный двигатель с датчиком положения ротора является обращенной машиной постоянного тока и его в отечественной литературе часто называют бесколлекторным двигателем постоянного (тока или вентильным электродвигателем), можно реализовать более простой, третий алгоритм управления двигателем – режим автокоммутации в сочетании со стабилизацией

тока двух включенных фаз. Структурная схема этого варианта приведена на рис. 3. При данном алгоритме управления по сигналу с ДПР в определенной последовательности включаются транзисторы преобразователя частоты, подключая две фазы статора двигателя к источнику постоянного напряжения. За шесть тактов трехфазного инвертора напряжения МДС статора сделает один оборот.

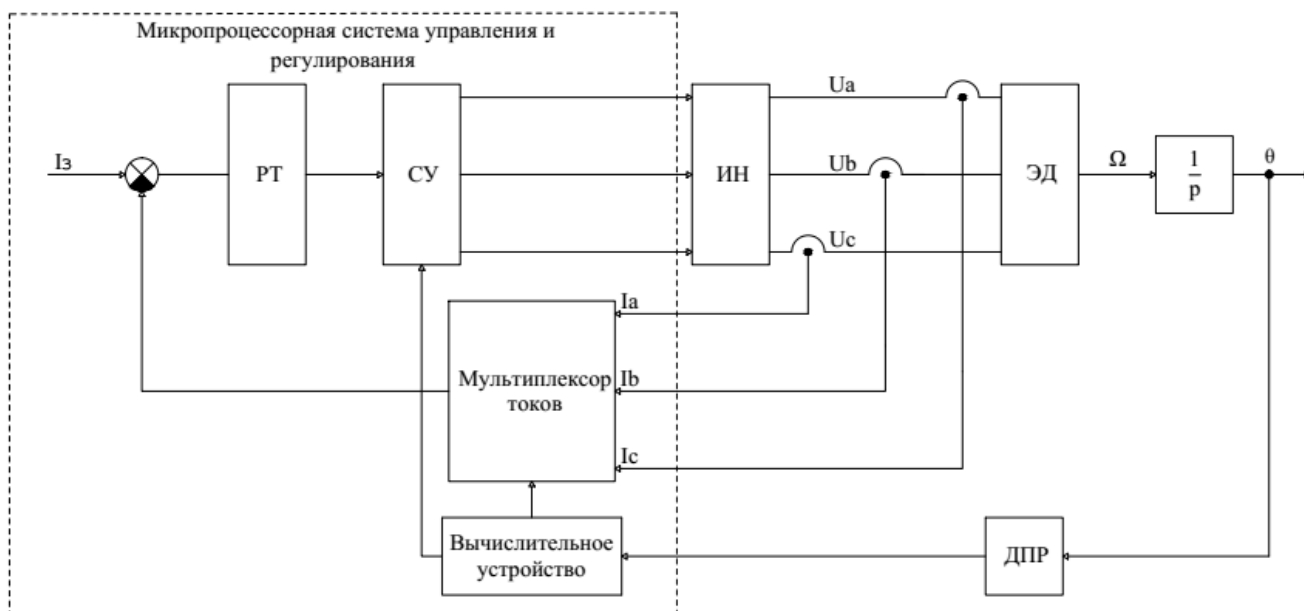


Рис. 3. Структурная схема электропривода на базе вентильного двигателя со свойствами источника момента

Поддержание тока включенных фаз статора на заданном уровне осуществляется ШИМ транзисторов интеллектуального силового инвертора напряжения. Поскольку задание на ток может быть как положительное, так и отрицательное, то в режиме ШИМ с поочередным управлением работают все четыре транзистора двух стоек инвертора, к которым подключены включенные фазы.

Обратная связь по току формируется малоинерционными датчиками фазных токов с гальванической развязкой и однополярным питанием. Аналоговый сигнал датчика формируется в смещенном виде, что позволяет измерять ток, протекающий в обоих направлениях. Мультиплексор, на который поступают сигналы датчиков, по сигналу датчика положения ротора формирует на выходе сигнал датчика тока включаемой фазы и придает сигналу обратной связи нужную полярность.

Проведенная оптимизация контура тока на модульный оптимум позволила получить параметры пропорционально-интегрального регулятора. Поскольку оптимизация контура проводилась в относительных единицах, то полученные значения коэффициентов для пропорционального и интегрального звеньев являются реальными и не требуют пересчета при реализации цифрового регулятора.

Осциллограммы тока и регулятора тока при настройке на модульный оптимум и настройке с перегулированием представлен на рис. 4.

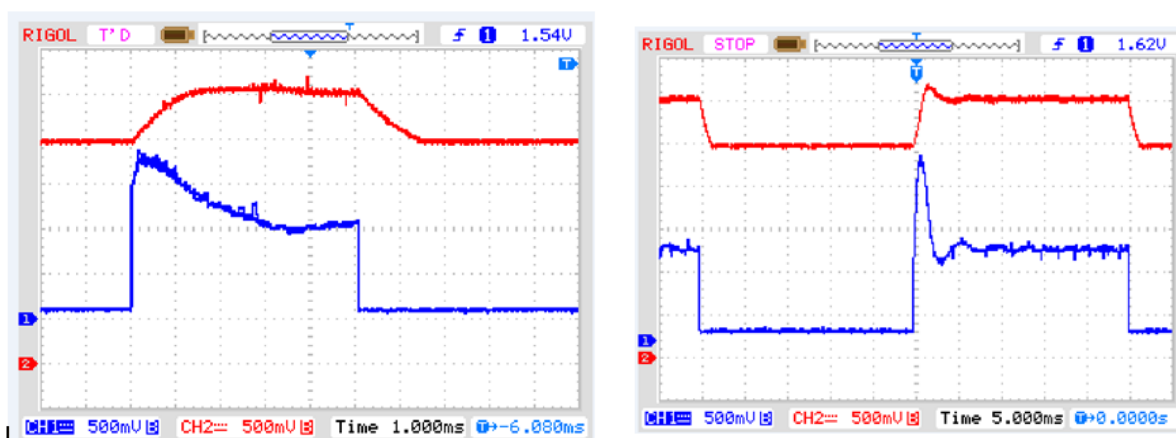


Рис. 4. Осциллограммы сигналов при разных настройках регулятора тока:
a - оптимальный переходный процесс; *б* – процесс отработки задающего сигнала с перегулированием

В настоящее время разработанный электропривод на базе вентильного двигателя со свойствами источника момента проходит стендовые и ходовые испытания в составе электроусилителя руля малотоннажного автомобиля.

Библиографический список

1. **Анучин, А.С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. **Соколовский, Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
3. **Терехов, В.М.** Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
4. **Чернов, Е.А.** Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: справочное пособие / Е.А. Чернов, В.П. Кузьмин. – Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1989. – 320 с.
5. Интеллектуальный транзисторный инвертор напряжения для низковольтных двигателей переменного тока / И.В. Багрецов [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018.

УДК 631.3

А.Б. Дарьенков, В.А. Тихомиров, М.В. Сидоров, И.В. Ходыкина**ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ (6-10-20 КВ)**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Твердотельные регуляторы напряжения позволяют гибко регулировать напряжение в узле электрической сети. При их разработке и эксплуатации необходимо иметь исследовательский лабораторный комплекс, который давал бы возможность наблюдать рабочие параметры сети, настраивать регулятор, управлять его работой и составлять временной архив рабочих параметров. Предлагается аппаратный набор технических и программных средств для лабораторного стенда, приводится конструкция лабораторного стенда.

Solid state voltage regulators flexibly regulate the voltage in the node of the electrical network. During their development and operation it is necessary to have a research laboratory complex that would help to observe operating parameters of the network, debug the regulator, control its operation and make up the temporary archive of operating parameters. The hardware set of hardware and software for the laboratory stand is proposed, design of the laboratory stand is given.

Ключевые слова: лабораторный стенд, твердотельный регулятор напряжения, исследовательские испытания, измерительные датчики, промышленные контроллеры, сенсорная графическая панель.

Key words: laboratory stand, solid-state voltage regulator, research tests, measuring sensors, industrial controllers, touch screen panel.

Лабораторный стенд предназначен для проведения исследовательских испытаний силовой части экспериментального образца твердотельного регулятора напряжения (ТРН), замера и отображения входных и выходных параметров ТРН, для проведения исследовательских испытаний и отладки системы управления экспериментального образца ТРН.

Функциональная схема лабораторного стенда представлена на рис. 1.

Регулятор напряжения формирует регулируемые по фазе и величине напряжения, которые через вольтодобавочные трансформаторы TV1-TV3 добавляются к напряжениям сети A1, B1, C1 и создают требуемые напряжения в узле сети с источником энергии ИЭ2. Тем самым регулируются потоки электроэнергии между источником энергии A1-C1 и источником энергии ИЭ2.

Твердотельный регулятор напряжения выполнен на ключевых элементах (тиристорах или транзисторах) и имеет систему управления, формирующую нужные по величине и фазе напряжения на первичных обмотках вольтодобавочных трансформаторов.

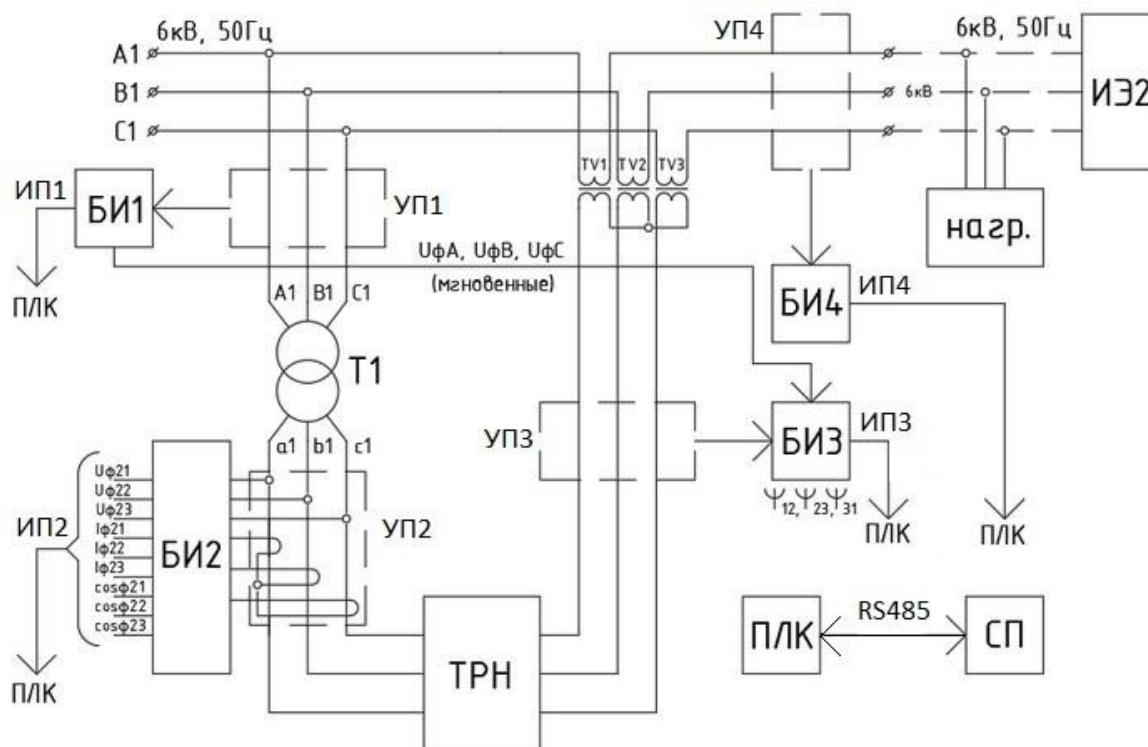


Рис. 1. Функциональная схема лабораторного стенда

Лабораторный стенд содержит набор блоков измерителей БИ1-БИ4, на выходе которых формируется набор измеряемых параметров ИП фаз источника энергии А1-С1, на входе и выходе ТРН, а также в узле сети с источником энергии ИЭ2. Каждый БИ состоит из нескольких промышленных сертифицированных датчиков, обеспечивающих контроль напряжений фаз и токов в фазах источников энергии в различных точках экспериментального образца ТРН, а также контролирующих фазовые углы между напряжениями и токами. Все датчики подключаются через соответствующие устройства подключения УП1-УП4. Измеренные величины с выходов датчиков через аналого-цифровые преобразователи (АЦП) поступают в промышленный контроллер (ПЛК), который вычисляет все остальные энергетические показатели при работе ТРН (активную, реактивную и полную мощности).

Полная мощность вычисляется по выражению $S=U \cdot I$.

Активная мощность определяется по формуле $P=S \cdot \cos\varphi$.

Реактивная мощность вычисляется по формуле $Q=\sqrt{(S^2 - P^2)}$.

Вычисление части показателей с помощью контроллера уменьшает количество датчиков и трасс по передаче информации от них к контроллеру.

Все показатели выводятся на экран сенсорной графической панели (СП). Промышленный контроллер определяет также выход измеряемых величин за допустимые границы и выдает предупреждающие сигналы на экран сенсорной панели.

Измерение напряжений, токов, фазовых углов, активной, реактивной и полной мощностей выполняется с помощью аппаратно - программных средств. Аппаратные средства представляют собой набор сертифицированных промышленных датчиков напряжений, токов и $\cos\varphi$, подключенных на входе и выходе ТРН. Имеется дополнительная собственная разработка на микроконтроллере для измерения фазовых углов между напряжениями исходной сети 6 кВ и сети с вольтодобавкой.

Информация от датчиков через АЦП передается в промышленный контроллер, который обрабатывает результаты измерений, масштабирует их и передает на сенсорную графическую панель. Промышленный контроллер определяет также выход измеряемых величин за допустимые границы и выдает предупреждающие сигналы. В качестве контроллера выбран хорошо зарекомендовавший себя в различных применениях контроллер тайваньской фирмы Fatek типа FBs-32MC со встроенным блоком питания 24 В. Питается контроллер непосредственно от однофазной сети 220 В. Программирование контроллера осуществляется с помощью сервисной программы WinProladder.

Аналого - цифровые преобразователи являются модулями расширения для контроллера. В качестве АЦП выбраны шестивходовые модули расширения типа FBs-6AD. На аналоговые входы модулей подаются от датчиков стандартные сигналы напряжения 0-10 В или тока 4-20 мА.

В контроллер встроена интерфейсная плата с двумя портами связи RS485, через которые он связан с сенсорной панелью. Сенсорная графическая панель служит для индикации измеряемых величин и отображения на экране в цифровом виде основных параметров на входе и выходе силовой части ТРН. В качестве сенсорной панели выбрана сенсорная графическая многоцветная панель тайваньской фирмы WEINTEK типа MT8104IN. Панель является многостраничной и может иметь до 2000 экранов. Программирование экранов сенсорной графической панели осуществляется с помощью сервисной программы EasyBuilder 8000. На экранах графической панели обеспечивается индикация рабочих, аномальных и аварийных режимов. Вид главного рабочего экрана и экрана для отображения параметров высоковольтной части ТРН представлен на скриншотах – рис. 2 и рис. 3.

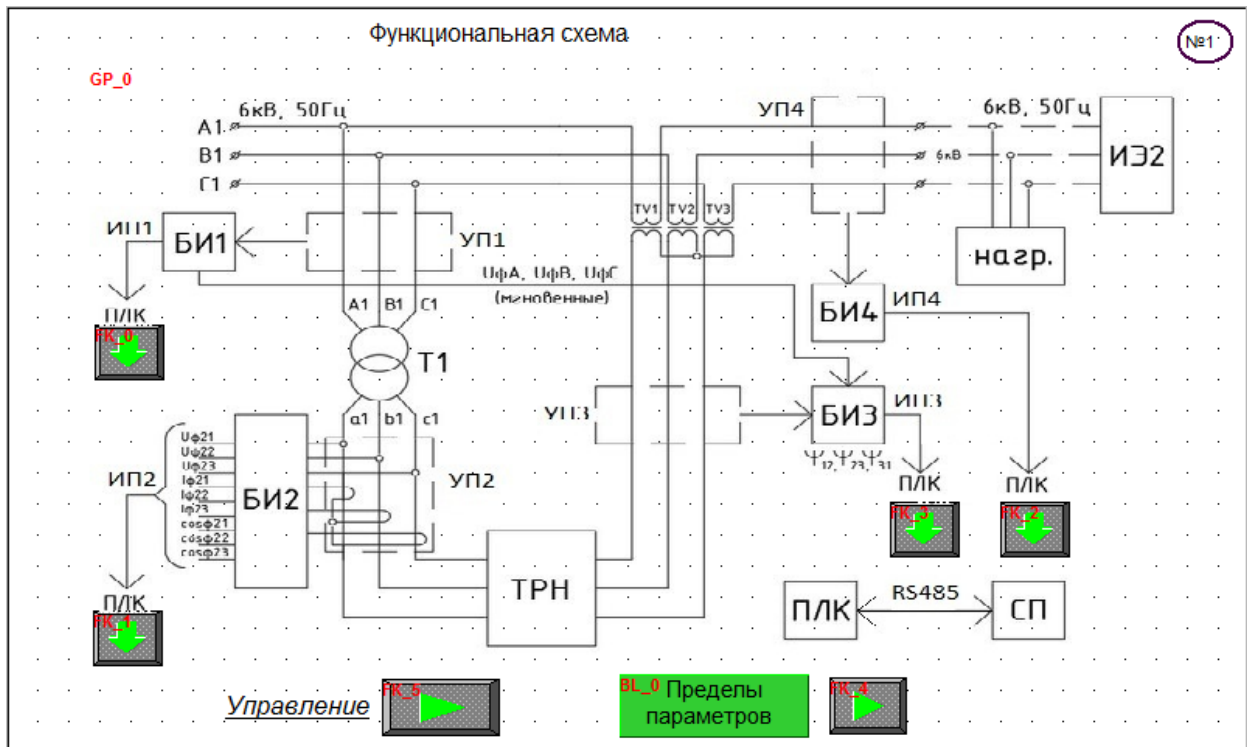


Рис. 2. Первый экран графической панели

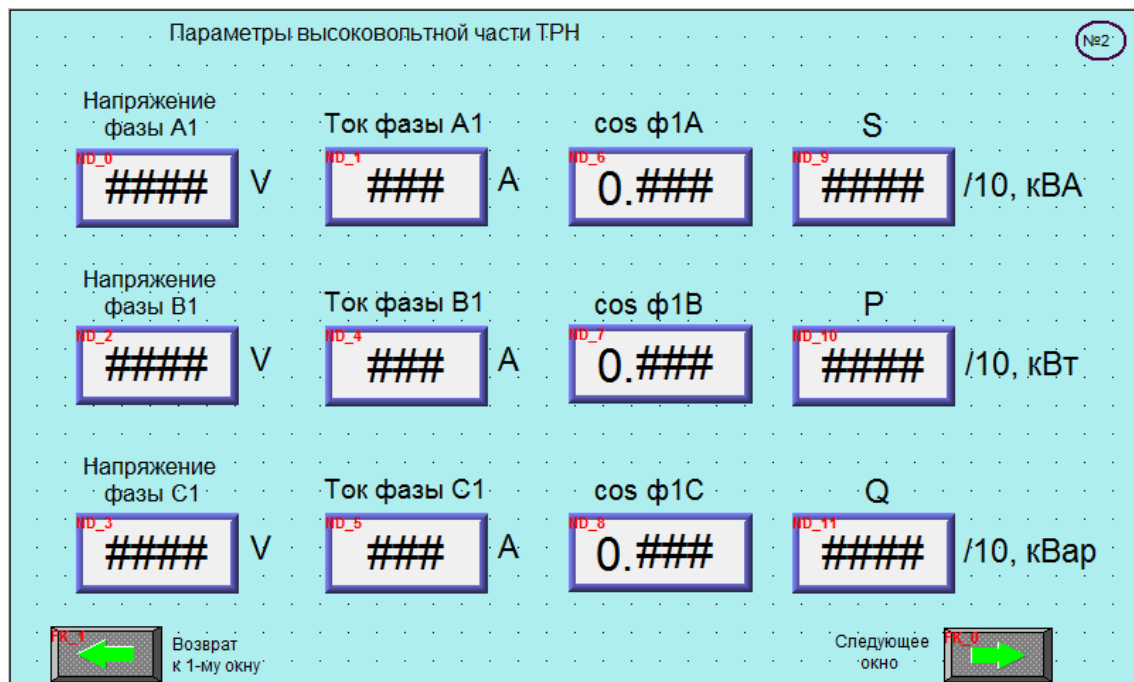


Рис. 3. Второй экран графической панели

Аналогично выглядят и остальные экраны. Всего их семь.

На флэш - карте создается архив всех основных измеренных величин.

Для измерения фазовых углов между напряжениями исходной сети 6 кВ и сети с вольтодобавкой разработана схема на микроконтроллере ATmega328P. Принцип измерения смещения напряжения фазы построен на измерении времени между передними фронтами импульсов, получаемых микроконтроллером на входах от фазы А, фазы В и фазы С. Значение разности фаз может быть как с

положительным, так и с отрицательным знаком. На рис. 2 показан случай положительного значения смещения напряжения фазы А, а на рис. 3 - случай отрицательного смещения.

Измеренное смещение фазы напряжения каждой из трех фаз программа преобразует в аналоговый сигнал посредством ШИМ и RC-фильтра. Этот сигнал меняется в диапазоне от 0 до 5 В. Он пропорционален измеренному значению смещения фаз, увеличенному по амплитуде на 2,5 В., т.е. нулевому смещению фаз соответствует значение выходного сигнала 2,5 В, смещению 180° эл. соответствует значение 5 В и значению -180° эл. соответствует 0 В.

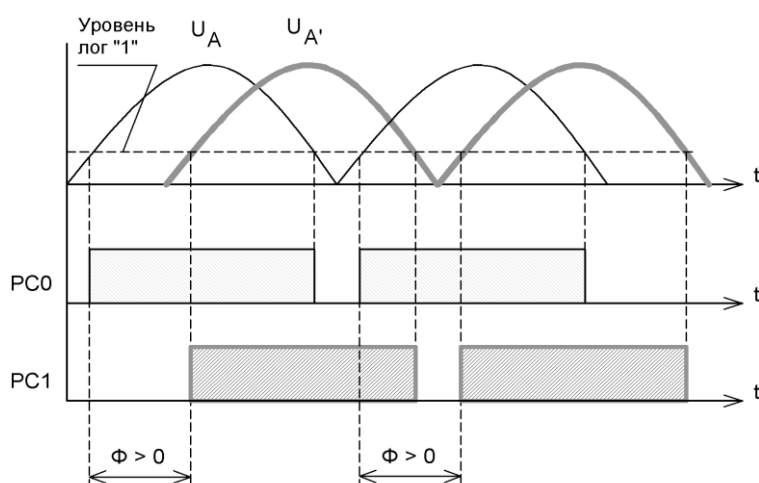


Рис. 4. Положительное смещение напряжения фазы А

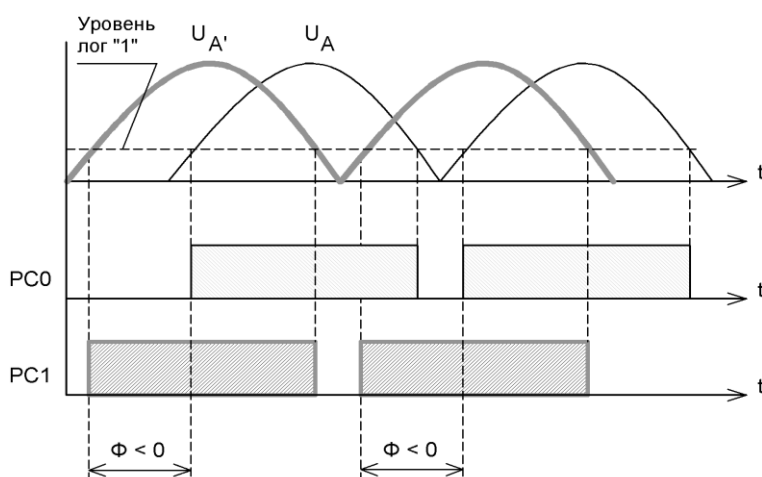


Рис. 5. Отрицательное смещение напряжения фазы А

На рис. 6 представлен эскиз конструкции лабораторного стенда.

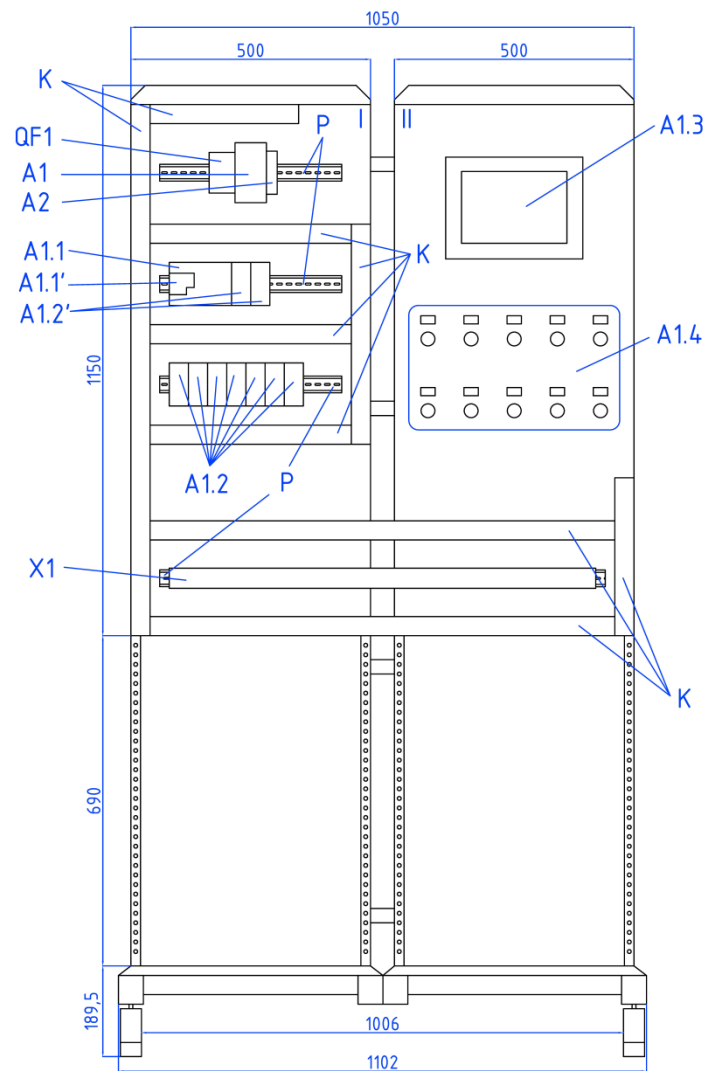


Рис. 6. Эскизный чертеж лабораторного стенда:

I и II – монтажные панели лабораторного стенда; QF1 – автоматический выключатель; A1 – блок питания 24 В; A2 – блок питания 5В; A1.1 – контроллер; A1.1' – плата связи; A1.2 – блок АЦП; A1.2' – блок ЦАП; A1.3 – сенсорная графическая панель; A1.4 – панель сигнальных ламп; X1 – клеммник; К – кабель-канал; Р – дин-рейка

Все оборудование стенда располагается на двух монтажных панелях. Стенд опирается на четыре колеса и может оперативно перемещаться относительно ТРН.

Заключение

Разработанный лабораторный стенд для проведения исследовательских испытаний силовой части экспериментального образца ТРН позволяет исследовать физические процессы, происходящие в силовой части экспериментального образца (ТРН) при его работе в различных режимах, а также отработать алгоритмы управления ТРН при различных параметрах нагрузки и изменениях режимов питающей сети.

Библиографический список

1. AutoCAD 2018, версия 22.0, релиз 32, дата выпуска 22.03.2017. [Электронный ресурс].
URL: <https://www.autodesk.ru/>
2. WinProLadder, версия 3.22, build 16630.Simulatorv1.2, build 131019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fatek.com/en/technical.php?act=software&catId=10>
3. EasyBuilder8000, версия 4.65.18, build 2015.07.23. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.weintek.net/easybuilder8000.html>
4. **Парр, Э.** Программируемые контроллеры: руководство для инженера: [пер. с англ.] / Э. Парр. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.
5. **Андреев, Е.Б.** Scada-системы Взгляд изнутри / Е.Б. Андреев, Н.А. Куцевич, О.В. Синенко. – М.: РТСофт, 2004. – 176 с.

УДК 621.752.3

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.С. Плехов², А.И. Ермолаев^{1,2}**ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ В СИСТЕМАХ ГАШЕНИЯ ВИБРАЦИИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**Институт проблем машиностроения Российской академии наук¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева²

Рассматриваются вопросы эффективного снижения уровней вибрации электротехнических комплексов с отводом избыточного тепла, выделяющегося при поглощении вибрации в магнитоуправляемых гидроопорах. Рассматриваются конструкции магнитоуправляемых гидроопор с тепловыми трубками различного назначения.

The article considers the issues of effectively reducing the vibration levels of the electrotechnical complexes with the removal of excess heat released during the absorption of vibration in magnetically gidroporo. The design of magnetically gidrokoro with heat pipes for various purposes.

Ключевые слова: магнитореологические трансформаторы (МРТ), гидроопоры, МР-демпфер, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), магнитореологическая жидкость (МРЖ), температурные градиенты. контурные тепловые трубы, фитиль, испаритель, конденсатор.

Key words: magnetorheological transformers (MRI), gidropony, Mr-damper, the amplitude-frequency characteristic (AFC), magnetorheological fluid (MRF), thermal gradients. contour heat pipes, wick, evaporator, condenser.

**1. Амплитудно-частотные характеристики и общие
коэффициенты трения гидроопоры в зависимости от температуры
рабочей жидкости**

Возникновение явлений вихреобразования потоков рабочей жидкости в МРТ гидроопор обусловлено, прежде всего, внешними вибрационными полями и температурными градиентами в рабочей жидкости [1]. Поэтому при построении концепции магнитореологического трансформатора гидроопор необходимо принимать в расчет температурные градиенты, понижающие динамическую вязкость магнитореологической жидкости (МРЖ) в его дроссельных каналах. Снижение вязкости МРЖ, приводит к потере демпфирующих свойств МРТ гидроопоры из-за незначительного теплоотвода и вырождения магнитореологического эффекта МРЖ [1, 2, 4, 5, 7]. В машиностроении снижение уровней шума и вибрации является актуальной проблемой, и построение концепции МРТ с отводом тепла от рабочей МРЖ приобретает решающее значение.

При построении концепции индукционного МРТ авторами выполнена оценка влияния температуры МРЖ на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) МРТ гидроопор с учётом экспериментальных измеренных их вибраци-

онных характеристик (рис. 1) [4, 5, 6], так как ранее предполагалось, что МЖ несжимаемая, её динамическая вязкость постоянна и её температура не учитывалась [9].

В реальной ситуации динамическая вязкость при нагреве МРЖ МРТ гидропор от 20°C - 80°C и выше изменяется с температурой и её необходимо учитывать. На рис. 1 представлена характерная зависимость динамической вязкости рабочей жидкости гидропоры (глицерина) от температуры $\eta_j(t^{\circ}) = \rho \cdot \zeta_j(t^{\circ})$, где $\zeta_j(t^{\circ})$ и ρ – кинематическая вязкость и плотность рабочей жидкости [9].

Поэтому и гидравлический коэффициент трения МРЖ в дроссельных каналах МРТ изменяется с ростом температуры и является *переменным* на каждой i – й частоте возбуждения гидропоры [6, 7].



Рис. 1. Зависимость динамической вязкости глицерина от температуры

Далее приведены расчётные АЧХ гидропоры ОГ- 90 (рис. 2, а, б, в) с учётом *переменного* на каждой i –й частоте возбуждения общего коэффициента трения (рис. 2, г, д, е) в диапазоне температур рабочей жидкости от 20°C , 30°C и до 40°C , построенные на основе расчёта полюсов и нулей передаточной функции гидропоры $T(s)_{1,i}$ [5, 6].

Расчёт общего коэффициента трения в эквивалентном дроссельном канале представлен на рис. 2 в виде зависимостей коэффициента трения от частоты возбуждения $f_{вi}$ для каждой температуры рабочей жидкости [5, 7, 9].

Из графиков (рис. 2, а, б, в) видим, что наиболее рациональным для гидропоры типа ОГ-90 является значение частот возбуждения $f_i = 25$ Гц и 75 Гц при температурах рабочей жидкости 20°C и 30°C . При этих частотах возбуждения экстремумы АЧХ гидропоры максимальны (рис. 2, а, б). При дальнейшем росте температуры рабочей жидкости до 40°C и выше наблюдается изменение экстремумов АЧХ. Это указывает на то, что с ростом температуры рабочей жидкости невозможно предварительно настроить гидропоры с МРТ на заданные резонансные частоты при изменяющейся нагрузке из-за неизбежного падения с ростом температуры общего коэффициента трения гидропоры (рис. 2, г, д, е). В результате МРТ теряет с течением времени свои демпфирую-

щие свойства из-за потери магнитореологического эффекта рабочей МРЖ [4, 5, 7, 8].

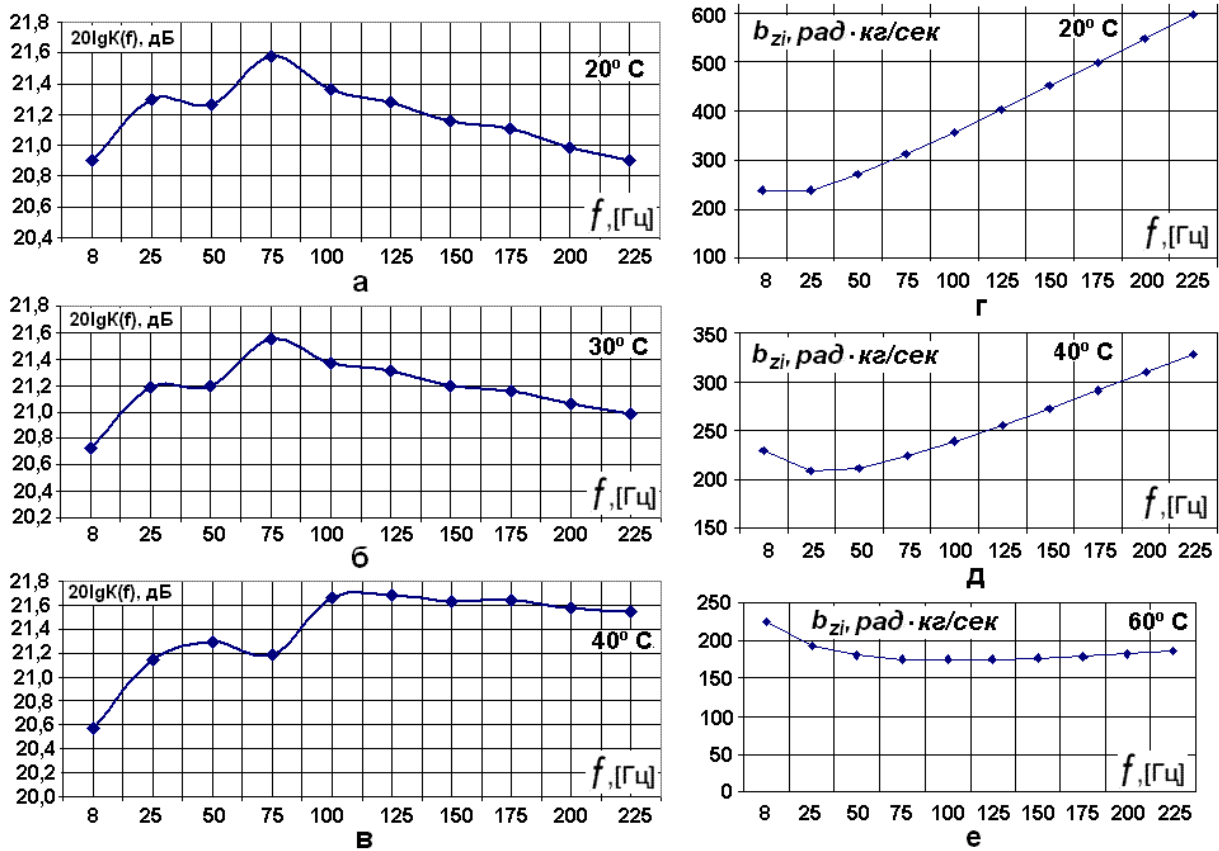


Рис. 2. Зависимости АЧХ (а, б, в) и общие коэффициенты трения гидропоры ОГ-90 для частот возбуждения при температурах рабочей жидкости 20 °С, 30 °С и 40 °С (з, д, е)

Из проведённой предварительно оценки влияния температуры МЖ на АЧХ МРТ гидропор сделан вывод [5]: для предварительной настройки гидропоры с МРТ на заданные резонансные частоты необходимо принимать меры по принудительному охлаждению рабочей МРЖ. Данный вывод поставил перед авторами необходимость принимать в расчет воздействие температуры и магнитного поля при построении концепции индукционного МРТ гидропоры.

Одним из решений проблемы отвода тепла от рабочей МРЖ является применение штока-поршня с коаксиальным дроссельным каналом с МРЖ в МР-демферах с КТТ, которые являются эффективными теплоотводами [11 - 16].

2. От дроссельных каналов МРТ к проводящему диамагнитному шток-поршню с коаксиальным кольцевым зазором в поперечном магнитном поле

Установлено, что магнитное поле в МРТ адаптивных гидропор может быть использовано для удержания вязкой рабочей МРЖ в их дроссельных каналах [1 - 4]. Такие модели адаптивных магнитореологических гидропор с воз-

буждающими электромагнитами (ВЭ) МГО – 90 – М1 и МГО – 90ТТ с классическими тепловыми трубами (ТТ) для отвода тепла от индукционных дроссельных каналов с МЖ представлены на рис. 3 и рис. 4. Данные МРТ гидропор рассчитаны на статическую нагрузку в 900Н.

Гидропора с МРТ без классических ТТ (рис. 3) содержит герметично закрытые рабочую и компенсационную камеры 4 [6]. Камеры 4 ограничены общим корпусом 3 с закрепленной в нем разделительной ферромагнитной перегородкой 7, 8, 9 с диамагнитными тангенциальными дроссельными каналами малого внутреннего диаметра 8 (порядка 1,5 - 2,0 мм), расположенными в её поверхностном слое по образующей между полюсами ВЭ 12. Диамагнитные дроссельные каналы 8 соединяют рабочую и компенсационную камеры 4. Рабочая камера ограничена опорной плитой 2 и эластичной обечайкой поршневого действия 1, а компенсационная – мембраной 5. Корпус 3 замыкается поддоном 17.

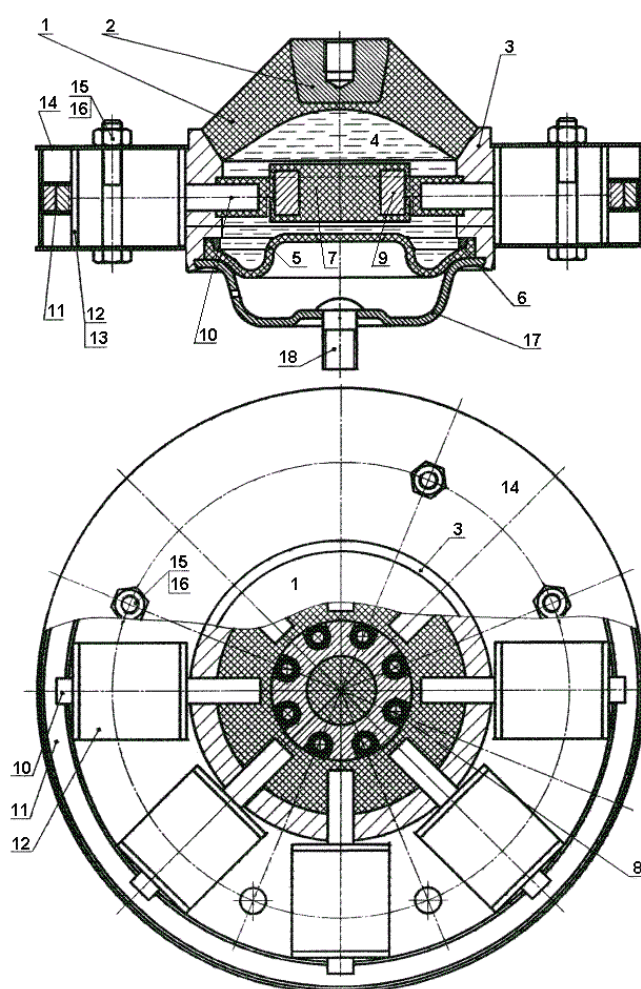


Рис. 3. Модель гидропоры с МРТ МГО – 90 – 1 с системой ВЭ:

1 – обечайка; 2 – опорная плата; 3 – корпус; 4 – рабочая и компенсационная камеры; Поддон; 5 – мембрана; 6 – уплотнительное кольцо; 7 – магнитная перегородка; 8 – дроссельные каналы; 9 – внутреннее стальное кольцо; 10 – стальной стержень ВЭ; 11 – внешнее стальное кольцо - ярмо; 12, 13 – катушка и каркас ВЭ; 14 – кожух в сборе; 15, 16 – стягивающие болт и гайка; 17 – поддон; 18 – болт крепления [3, 6]

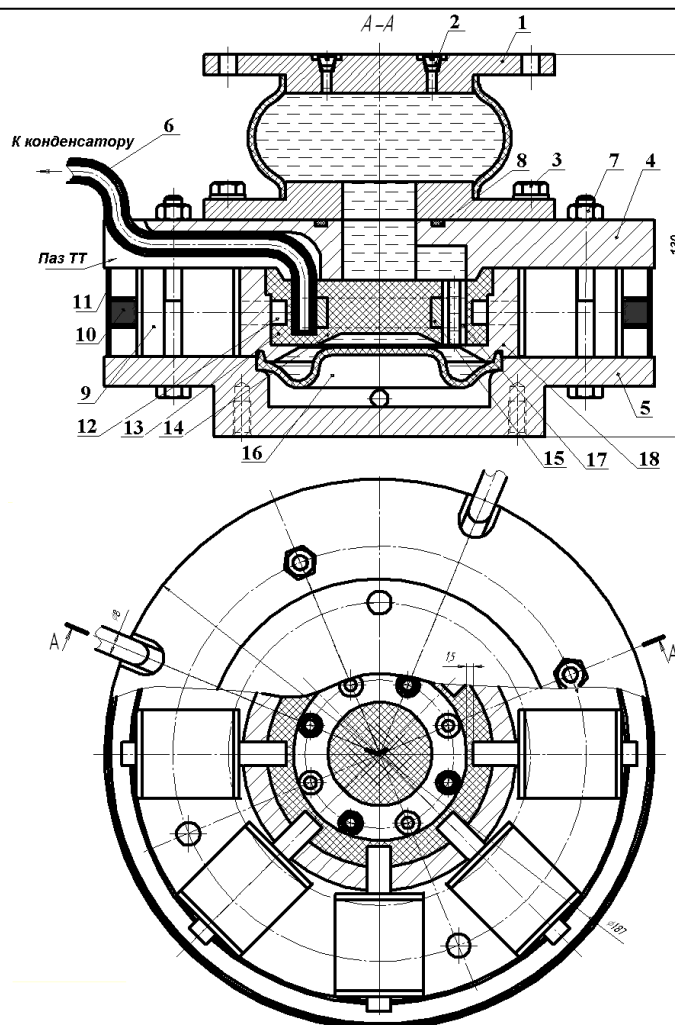
Металлическая перегородка 9 выполнена в виде кольца из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью, с отверстиями для встраиваемых диамагнитных дроссельных каналов 8 и является частью магнитопровода кольцевой электромагнитной системы. Кольцевая электромагнитная система МРТ состоит из набора ВЭ 12 с ферромагнитными сердечниками в виде цилиндрических стержней 10 с явно выраженными полюсами, внутренней ферромагнитной перегородки 9 и внешним ферромагнитным ярмом - кольцом 11. Здесь, у сердечников 10 ВЭ и перегородки 9 точка Кюри 767°C , что в пять раз выше нагрева МРЖ (150°C). Считаем магнитную проницаемость μ_c сердечников 10 ВЭ перегородки 9 постоянной. Полюса ВЭ 12 расположены поочередно, т.е. чередуются между собой на полюса S и N . Возбуждение МРТ гидроопоры осуществляется поперечным магнитным полем посредством изменения магнитного потока ВЭ – $L_1, L_2, \dots L_n$ при помощи напряжения возбуждения, формируемого в блоке возбуждения МРТ гидроопоры [3, 6].

Модель МРТ гидроопоры МГО – 90 – 1 (рис. 3, а) имеет существенный недостаток – в конструктивном исполнении МРТ не решена задача отвода тепла от дроссельных каналов с МЖ, так как предполагалась независимость магнитных свойств ферромагнитной дисперсной фазы МЖ от температуры.

Отвод тепла от управляемых дроссельных каналов с МРЖ в модели МРТ гидроопоры МГО – 90ТТ посредством ТТ может быть осуществлён в гидроопоре, конструкция которой представлена на рис. 4.

Представленный на рис. 4 МРТ гидроопоры с МРЖ и с управляемыми дроссельными каналами и ТТ собирается в следующей последовательности:

1. Корпус 13 с герметично заделанным в него кольцом 15 установить с герметиком во втулку 18.
2. В корпус 13 установить четыре тепловых трубки 6 и дроссельные трубки 17.
3. Вставить ферромагнитные сердечники 12 с установленными катушками 9 во втулку 18.
4. Установить кольцо 10 с кожухом 11 на сердечники 12.
5. Установить мембрану 16 и крышки 4 и 5. Стянуть крышки 4 и 5 между собой крепежными узлами 7. При установке крышки 4 тепловые трубки 6 разместить в пазах крышки 4.
6. Установить кольцо 8 и крепежными узлами 3 закрепить на крышке 4 сильфон 1.
7. Залить во внутреннюю полость гидроопоры магнитную жидкость и заглушить заливные отверстия пробками 2.



Порядок сборки МРТ гидроопоры с ТТ

Рис. 4. Модель МРТ гидроопоры МГО – 90ТТ:

1 – жаростойкий сильфон (температура рабочей среды от -10°C до $+150^{\circ}\text{C}$); 2 – заливные отверстия с пробками; 3 – узлы крепления сильфона; 4 – верхняя защитная крышка; 5 – вторая защитная крышка – основание/поддон; 6 – тепловые трубы; 7 – крепёжные узлы; 8 – уплотнительное кольцо; 9 – катушки ВЭ; 10 – внешнее ферромагнитное кольцо; 11 – защитный кожух; 12 – ферромагнитные сердечники ВЭ; 13, 14 – диамагнитный корпус дроссельной перегородки с концентрическим пазом; 15 – внутреннее ферромагнитное кольцо дроссельной перегородки; 16 – мембрана; 17 – дроссельные каналы; 18 – концентрическая втулка

Охлаждение управляемых дроссельных каналов с МЖ в модели МРТ гидроопоры посредством классических тепловых труб (рис. 4) осуществить технологически возможно, но достаточно сложно. Это видно при рассмотрении самой модели МРТ гидроопоры МГО – 90ТТ. Осуществить отвод тепла от разогретой МЖ технологически проще, если перейти от МРТ гидроопоры с дроссельными каналами к магнитреологическому демпферу (МР-демперу) снижения ударных нагрузок, рабочим органом которого служит проводящий ферромагнитный шток-поршень, совершающий возвратно-поступательное вертикальное движение в малом кольцевом зазоре.

3. Отвод тепла в МР-демпферах с магнитной жидкостью

В работах [4, 5] авторами установлено, что с ростом температуры рабочей МРЖ невозможно предварительно настроить МРТ гидропоры на заданные резонансные частоты при изменяющейся нагрузке из-за неизбежного падения с ростом температуры гидравлических коэффициентов трения гидропоры, обусловленных большим падением динамической вязкости МРЖ.

Это связано также и с тем, что всем ферромагнитным материалам присуще фундаментальное свойство разрушения дальнего магнитного порядка при нагреве вплоть до его полного исчезновения, при котором возникают [6]:

- ограничения использования магнитореологического эффекта при температурах, близких к точке Кюри;

- совместное воздействие магнитного поля и нагрева МРЖ до температур, близких к точке Кюри, при заданной скорости сдвига уменьшает эффективную вязкость МРЖ вплоть до полного вырождения магнитореологического эффекта;

- в МРТ гидропоры при температуре нагрева МЖ, близкой к $T = 145^{\circ}\text{C}$, эффективная вязкость МЖ асимптотически приближается к некоторой величине, лежащей в области критической температуры, а воздействие поля постепенно ослабевает.

В связи с этим, одним из решений проблемы отвода тепла от МЖ в МР-демпферах является применение контурных тепловых труб, которые осуществляют наиболее эффективно передачу тепла от одних устройств к другим и являются эффективно действующими теплоотводами [11 - 16].

В МРТ МР-демпферах необходимо применять небольшие тепловые трубки (ТТ), или контурные тепловые трубы для проведения тепла от дроссельных каналов или кольцевых зазоров с разогретой МРЖ (источника тепла) к конденсатору (приёмнику тепла) [11, 12].

Принцип действия ТТ поясняется на действии тепловой трубки солнечного коллектора (рис.5) [11].

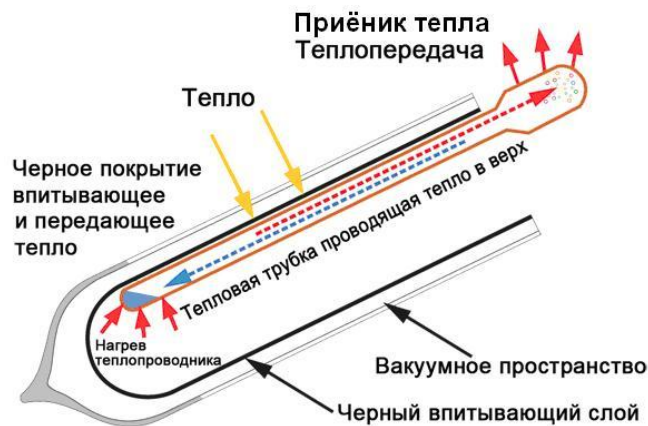


Рис. 5. Тепловая трубка солнечного коллектора, проводящая тепло вверх

Так, ТТ (рис. 5) обычно представляется как полая с пространством внутри и вакуумом сверху. В этом случае вакуум не является целью, скорее служить изменению состояния жидкости внутри. Внутри ТТ находится небольшое количество очищенной воды и специальных добавок. Известно, что при обычном атмосферном давлении вода закипает при 100°C ($373,15^{\circ}\text{K}$), но если атмосферное давление падает, то температура кипения будет меньше, чем 100°C ($373,15^{\circ}\text{K}$). Это происходит из-за разницы в давлении воздуха. Основываясь на разнице в давлении воздуха и создавая вакуум в ТТ, можно достичь температура кипения меньшей, чем 100°C ($373,15^{\circ}\text{K}$) [11].

Например, ТТ, используемые в солнечных коллекторах, имеют температуру кипения всего 30°C ($303,15^{\circ}\text{K}$). Поэтому, когда ТТ нагревается выше 30°C ($303,15^{\circ}\text{K}$) вода испаряется. Этот пар быстро поднимается к верхней части ТТ передачи тепла (приёмнику тепла – конденсаторе) (рис. 13). Когда тепло теряется в конденсаторе, пар конденсируется с образованием жидкости (воды) и возвращается к нижней части ТТ (источника тепла), чтобы еще раз повторить процесс.

Классическая ТТ (рис. 6) представляет собой вытянутый в длину герметичный, как правило, тонкостенный металлический сосуд 1, внутренние стенки которого выложены капиллярно-пористым материалом 2 (так называемым фитилём) [11, 12]. Фитиль имеет малую толщину и пропитан рабочей жидкостью (водой). Внутренний объём 3, свободный от фитиля, заполнен паром этой жидкости и является паровым каналом. Участок ТТ, к которому подводится тепло, является испарителем, а участок, от которого оно отводится - конденсатором рабочей жидкости.

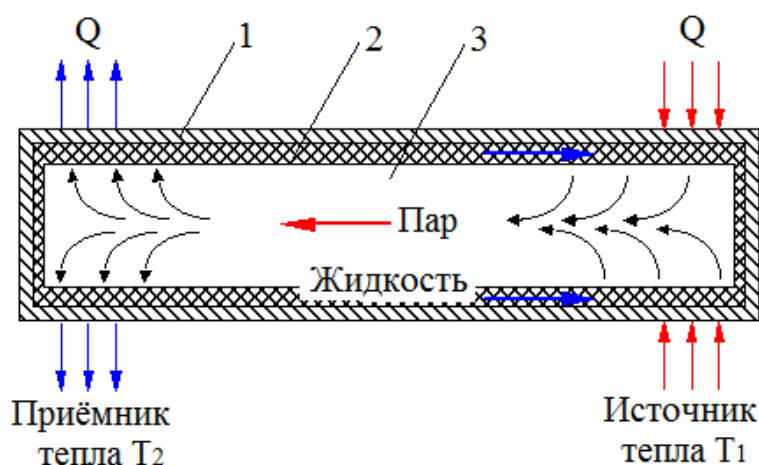


Рис. 6. Классическая тепловая труба

Если один конец ТТ подключить к источнику тепла с температурой T_1 , а противоположенный - к приёмнику тепла с температурой T_2 , которая несколько ниже T_1 , то ТТ будет передавать значительное количество тепла Q , которое во много раз больше, чем тепло, передаваемое сплошным стержнем, изготовлен-

ным из самых теплопроводных материалов и имеющим те же габариты и такую же разность температур между концами, что и ТТ [11, 12].

При нагреве испарителя рабочая жидкость испаряется из пор фитиля этого участка в паровой канал. При этом давление пара в этой зоне повышается. В то же время при охлаждении конденсатора давление пара в нём понижается. Под действием возникшей разности давлений пар в паровом канале движется от испарителя к конденсатору, где он конденсируется. Образовавшаяся жидкость впитывается в поры фитиля конденсатора и за счёт капиллярных сил подается по порам в испаритель, где вновь испаряется. Таким образом, ТТ работает на принципе замкнутого испарительно-конденсационного цикла.

При температурах вдали от критической скорость пара, как правило, значительно превышает скорость жидкости в фитиле. Высокая теплопередающая способность ТТ достигается не только за счёт циркуляции теплоносителя при высокой скорости пара, но и высокой теплоты парообразования и его конденсации [11, 12, 14].

Таким образом, в ТТ имеет место не обычная теплопроводность, которая относительно мала, а гидравлический перенос тепла при двух противоположных друг другу фазовых превращениях теплоносителя. Насосом, обеспечивающим циркуляцию как жидкого, так и парообразного теплоносителя, является фитиль. От его геометрических, теплофизических и гидравлических характеристик зависит теплопередающая способность ТТ [11, 12, 14]. Сюда следует отнести такие параметры, как теплопроводность каркаса фитиля, его пористость, распределение пор по радиусам, проницаемость для рабочей жидкости. Эта способность не в меньшей степени зависит от характеристик и самого теплоносителя: давления насыщенного пара, теплоты испарения, вязкости, плотности жидкости и пара, теплопроводности, поверхностного натяжения, смачивания им твёрдых стенок капиллярных каналов фитиля. Все эти параметры зависят от температуры и изменяются вместе с тепловой нагрузкой на ТТ. Для среднетемпературных ТТ в качестве рабочих жидкостей используются такие капельные жидкости, как вода, спирты, ацетон, некоторые фреоны и т. д. [11 - 15].

Если внешняя задача передачи тепла с помощью ТТ решается относительно просто и сводится в основном к теплопередаче на её концах, то внутренняя, связанная с процессами испарения и конденсации в пористой среде, а также с транспортировкой жидкости и пара вдоль ТТ, представляет в ряде случаев большие трудности [12, 15].

При отсутствии разности температур между испарителем и конденсатором в ТТ нет циркуляции теплоносителя. Такая циркуляция возникает только когда образуется такая разность. Если считать, что поверхность жидкости в конденсаторе плоская или близкая к ней (а там, как правило, всегда есть, хотя и небольшая «лужа» с плоской поверхностью жидкости), то эта разность температур приводит к разности давлений по обе стороны поверхностей вогнутых менисков жидкостей только в испарителе [11, 14].

Таким образом, поверхности этих менисков можно рассматривать не только как генераторы пара, но и как поверхности, не пропускающие пар обратно в жидкость. Мениски в испарителе - это тепловой капиллярный насос,

работающий при разности температур и фазовых превращениях. Разность давлений, которую он создаёт, обеспечивает всю гидравлику ТТ [11, 12, 14].

Основное (гидравлическое) уравнение тепловой трубы без учёта изменения количества движения и гравитационного воздействия на течение пара в виде его малой плотности может быть представлено в виде [11, 12, 14]

$$\Delta P_{\max} \geq \Delta P_g + \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P_{\text{п}} , \quad (1)$$

где ΔP_{\max} - максимальный капиллярный напор (абсолютная величина разности капиллярных давлений), которую может создавать фитиль данной ТТ на данном теплоносителе при данной температуре. Самое высокое давление в ТТ - это давление пара над менисками в испарителе, а самое низкое давление в ТТ - давление жидкости под этими же менисками в испарителе. ΔP_g - разность гидростатических давлений жидкости в порах фитиля между концами ТТ. Считается, что аналогичные потери в паре отсутствуют из-за его малой плотности. $\Delta P_{\text{ж}}$ - гидравлическое сопротивление (потери на трение) при движении жидкости по фитилю; $\Delta P_{\text{п}}$ - гидравлическое сопротивление при движении пара в паровом канале.

В стационарно работающей ТТ всегда сумма потерь давлений равна разности капиллярных давлений ΔP , которое обязательно в данном случае и создаёт фитиль [11, 12, 14], то есть

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P_{\text{п}} . \quad (2)$$

Гидравлические сопротивления $\Delta P_{\text{ж}}$ и $\Delta P_{\text{п}}$ проявляются только во время работы ТТ и возрастают при увеличении её длины и передаваемой мощности. Поэтому в неработающей ТТ эти гидравлические потери, имеющие место только при движении теплоносителя, отсутствуют, то есть $\Delta P_{\text{ж}} = 0$, $\Delta P_{\text{п}} = 0$ и $\Delta P = \Delta P_g$. Величина ΔP_g возрастает при увеличении превышения испарителя над конденсатором и становится максимальной, когда ТТ находится в вертикальном положении, то есть когда её испаритель находится «вверху» [11, 12, 14]. В неработающей ТТ малого диаметра, расположенной в поле тяжести горизонтально $\Delta P_g = 0$, $\Delta P_{\text{ж}} = 0$, $\Delta P_{\text{п}} = 0$ и $\Delta P = 0$.

В любом случае, чтобы ТТ могла работать, должно соблюдаться условие $\Delta P = \Delta P_{\max}$, то есть всегда должен иметься запас в разности давлений, которую может создать фитиль [11, 12, 14]. Величина ΔP_{\max} зависит от рода жидкости, материала фитиля, диаметров его пор и температур. ΔP_{\max} - это максимальный напор, который может создавать капиллярный насос на выбранной рабочей жидкости. И казалось бы, надо стремиться к его увеличению. Величина ΔP_{\max} есть важная потенциальная характеристика фитиля, но она отражает только одну сторону - способность создавать разность давлений. Но, с другой стороны, увеличение ΔP_{\max} может быть осуществлено только уменьшением диаметров капиллярных каналов, что приведёт к увеличению гидравлического сопротивления $\Delta P_{\text{ж}}$. При этом увеличение ΔP_{\max} происходит значительно медленнее, чем увеличение гидравлического сопротивления трения $\Delta P_{\text{ж}}$ [11, 12, 14].

Поэтому для данных размеров фитиля имеется оптимальный диаметр капиллярных каналов, который уменьшать нельзя. В противном случае снизится мощность или повысится разность температур между испарителем и конденсатором [11, 12, 13].

В наиболее общем случае, когда вогнутые мениски есть не только в испарителе, но и в конденсаторе, а сами мениски имеют правильную сферическую поверхность [11, 14], то для данной жидкости, температуры и радиусов капиллярных каналов максимальная разность капиллярных давлений на основании уравнения Лапласа представляется в виде (3) и рис. 7. Здесь одинаковые главные радиусы кривизны, что в реальных структурах маловероятно [11, 12, 14].

$$\Delta P_{\max} = 2\sigma \left(\frac{1}{R_{\text{И}}} - \frac{1}{R_{\text{К}}} \right) = 2\sigma \left(\frac{\cos\Theta_{\text{И}}}{r_{\text{ПИ}}} - \frac{\cos\Theta_{\text{К}}}{r_{\text{ПК}}} \right), \quad (3)$$

так как $r = R \cdot \cos\Theta$, где σ - коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела жидкость-пар, который уменьшается при повышении температуры примерно по линейному закону и при $T_{\text{кр}}$ равен нулю.

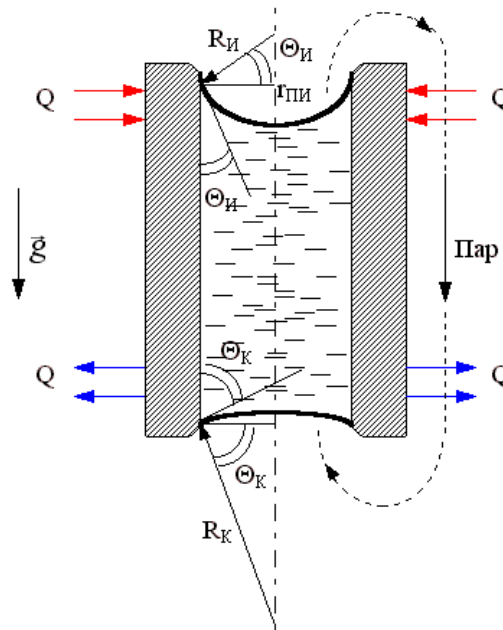


Рис. 7. Одиночный капилляр в поле тяжести

На рис. 7 $R_{\text{И}}$, $R_{\text{К}}$ - радиусы кривизны менисков в испарителе и конденсаторе. Если центр кривизны находится вне жидкости, то радиус считается отрицательным.

Чем меньше R , тем ниже давление жидкости под мениском по сравнению с плоской поверхностью. $r_{\text{ни}}$, $r_{\text{нк}}$ - средние радиусы пор (капиллярных каналов) в испарителе и конденсаторе. $\Theta_{\text{И}}$, $\Theta_{\text{К}}$ - краевые углы смачивания в испарителе и конденсаторе - углы между касательными к жидкости на краю менисков и

твёрдой стенкой, залитой жидкостью. Чем меньше Θ_u и больше Θ_k , а также чем меньше R_u и больше R_k , тем выше ΔP_{\max} .

При увеличении тепловой нагрузки Q вогнутые мениски в испарителе прогибаются сильнее, их кривизна увеличивается, радиусы кривизны R_u уменьшаются и стремятся к радиусам пор (капиллярных каналов). При этом краевые углы в испарителе Θ_u также уменьшаются, а отрицательное давление Лапласа на жидкость увеличивается, а давление под её поверхностью уменьшается. При этом вогнутые мениски в конденсаторе уменьшают свою кривизну, краевые углы увеличиваются, отрицательное давление Лапласа уменьшается. Поэтому абсолютная величина разности капиллярных давлений, всегда равная величине потерь, увеличивается [11, 12, 14].

При дальнейшем увеличении нагрузки мениски в конденсаторе становятся близкими к плоским ($R_k \rightarrow \infty$), второй член в уравнении (3) обращается в ноль, а капиллярный напор становится равным

$$\Delta P = 2\sigma \frac{\cos\Theta_u}{r_{\text{пн}}} . \quad (4)$$

Практически в ТТ всегда есть некоторый избыток жидкости, который в вертикально работающей трубе находится в конденсаторе. Поэтому поверхность жидкости в конденсаторе можно считать близкой к плоской, а повышение разности капиллярных давлений ΔP происходит только за счёт увеличения кривизны менисков в испарителе. Дальнейшее увеличение ΔP при данном радиусе пор $r_{\text{пн}}$ возможно только путём улучшения смачивания фитиля. При полном смачивании

$$\Theta_u = 0, \quad \cos\Theta = 1, \quad \Delta P_{\max} = \frac{2\sigma}{r_{\text{пн}}} . \quad (5)$$

При увеличении тепловой нагрузки на ТТ температура повышается, величина σ , а следовательно, и ΔP_{\max} уменьшаются, а потери по пару и жидкости ΔP при этом возрастают и стремятся к своему максимальному значению ΔP_{\max} . Когда $\Delta P = \Delta P_{\max}$ дальнейшее увеличение нагрузки становится невозможным. Улучшение работы классической ТТ в результате уменьшения радиуса пор малоэффективно, так как оно при тех же размерах фитиля приводит к одновременному увеличению ΔP и уменьшению ΔP_{\max} [11, 12, 14].

Значительное увеличение длины классической ТТ (рис. 7), даже при работе в горизонтальном положении, наталкивается на определённые трудности. Это связано, с одной стороны, с увеличением потерь как по пару, так и жидкости, что снижает предельную мощность, а с другой - с изготовлением и монтажом длинных фитилей, особенно в том случае, если ТТ имеет изгибы корпуса [12, 13].

Особые трудности в классических ТТ возникают, когда передача тепла должна производиться по направлению поля тяжести, то есть когда испаритель

находится «вверху» или при других ускорениях, направленных против движения жидкости. В этом случае классические ТТ даже малой длины малоэффективны - у них сильно снижаются плотности как осевых, так и радиальных потоков тепла. Основная причина состоит в том, что при такой ориентации тепловых труб неизбежно добавляются гидростатические потери давления в виде [11, 12, 14]

$$\Delta P_g = \rho_{\text{ж}} g h, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости; h - «высота» тепловой трубы; g - ускорение силы тяжести. Эти потери не зависят от поперечного сечения фитиля. Уменьшать их не представляется возможным. При этом, как правило, гидростатические потери в паре $\rho_{\text{ж}} g h$ из-за малой его плотности не учитываются.

Для подъёма жидкости на высоту h приходится применять более мелкие поры. В этом случае гидравлические сопротивления трения ($\Delta P_{\text{ж}}$) значительно возрастает и не только из-за уменьшения диаметров капиллярных каналов, но и ещё и за счёт увеличения длины фитиля. Дальнейшее уменьшение диаметров капиллярных каналов при тех же размерах (длине) фитиля практически не приводит к увеличению мощности ТТ [11 - 16].

Причина заключается в том, что увеличение напора ΔP_{max} при уменьшении этих диаметров происходит значительно медленнее, чем увеличение гидравлического сопротивления фитиля $\Delta P_{\text{ж}}$ - разность капиллярных давлений обратно пропорциональна диаметрам пор, а гидравлическое сопротивление трения при ламинарном течении жидкости по фитилю обратно пропорционально более чем второй степени этих диаметров [11 - 16]. Но, тем не менее, увеличение длины ТТ, передающих теплоту по направлению поля тяжести, всё же возможно. Но для этого должна быть изменена их конструкция.

Поскольку гидростатические потери давления уменьшать нельзя, то конструкция ТТ должна быть такой, при которой увеличение длины ТТ, передающей теплоту по направлению поля тяжести при той же её мощности, или увеличение мощности при той же длине ТТ осуществлялось за счёт увеличения разности максимального капиллярного напора ΔP_{max} и гидравлических потерь в жидкости $\Delta P_{\text{ж}}$, то есть путём увеличения величины $\Delta P_{\text{max}} - \Delta P_{\text{ж}}$. Это может быть достигнуто при одновременном увеличении как разности капиллярных давлений ΔP_{max} , так и при уменьшении $\Delta P_{\text{ж}}$ [11 - 16].

Увеличение ΔP_{max} на той же рабочей жидкости возможно только путём уменьшения диаметров капиллярных каналов, а уменьшение потерь на трение $\Delta P_{\text{ж}}$ (при таком же уменьшении диаметров этих каналов и при том же поперечном сечении фитиля) возможно только при значительном уменьшении длины

фитиля. Очевидно, последнее в классических ТТ без уменьшения их длины просто не возможно [11 - 16].

Таким образом, задача передачи тепла по направлению поля силы тяжести приводит к такой конструкции ТТ, в которой мелкопористый фитиль, создающий необходимый и достаточно большой капиллярный напор, должен обладать малым гидравлическим сопротивлением по жидкости, то есть иметь небольшую толщину, а следовательно, находиться только в испарителе [12, 16].

Применение контурных тепловых труб является альтернативной концепцией и для отвода тепла от разогретой МРЖ в коаксиальных каналах МР-демпферов. Действие КТТ в МР-демпферах также основано на принципе кипения теплоносителя (воды) в испарителе (источнике тепла) при более низкой температуре воздуха с пониженным давлением [11 - 16]. Создавая вакуум в КТТ МР-демпферов, можно достичь температуры кипения меньше 100°C ($373,15^{\circ}\text{K}$). Испарители КТТ, используемые в МР-демпферах, должны иметь температуру кипения около 30°C ($303,15^{\circ}\text{K}$).

Отвод тепла в МР-демпферах с МРЖ посредством КТТ может быть осуществлён в МР-демпфере, конструкция которого представлена на рис. 8.

Схема охлаждения МР-демпфера (рис. 8) содержит КТТ, которая состоит из герметичного корпуса с испарителем 24, помещённым внутри диамагнитного корпуса 9 МР-демпфера и размещённого достаточно близко к источнику тепла (ферромагнитному штоку-поршню с коаксиальным каналом с нагретой МРЖ), конденсатор 1, подключённый к приёмнику тепла – радиатору 2. Испаритель и конденсатор соединены между собой паровым и жидкостным каналами 3. Обычно паровой и жидкостный каналы 3 - это пустотелые трубки небольшого диаметра до 5 мм.

Особенность испарителя КТТ в конструкции МР-демпфера состоит в том, что испаритель реализован из восьми фитилей капиллярно-пористой структуры небольшого диаметра, расположенных между ферромагнитными сердечниками 23 в виде цилиндрических стержней. Такое расположение фитилей испарителя КТТ между ферромагнитными сердечниками 23 позволяет отводить тепло не только от самих сердечников ВЭ, но и от коаксиального канала с рабочей МРЖ, что относится к достоинствам данной конструкции МР-демпфера.

Применение в МР-демпфере испарителя с восьмью КТТ для проведения тепла от ферромагнитного штока-поршня с цилиндрическим коаксиальным каналом с нагретой МРЖ (источника тепла) к конденсатору (приёмнику тепла) позволяет, благодаря наличию компенсационной полости и тонкой запорной стенки, отделяющей пар от жидкости, последовательное питание фитилей жидкостью заменить на питание, близкое к параллельному. Кроме этого, из-за малых размеров фитилей упрощается технология их изготовления и монтаж в корпус КТТ [12, 13]. Все детали КТТ (за исключением фитилей) выполняются из нержавеющей стали.

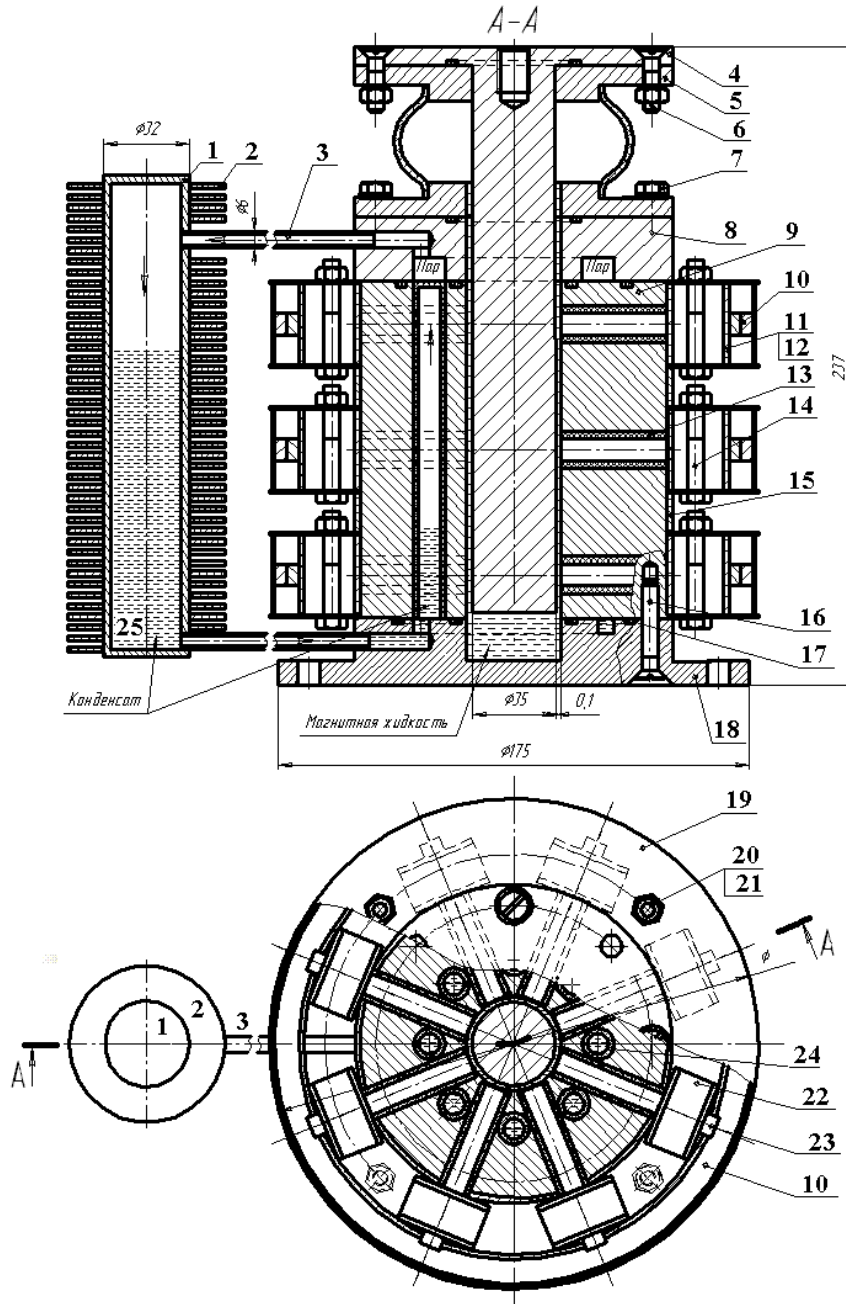


Рис. 8. Схема охлаждения МРТ МР-демпфера с КТТ:

1 – конденсатор; 2 – ребристый радиатор конденсатора; 3 – паровой канал и жидкостный канал; 4 – опорная плата с штоком-поршнем; 5 – фланцы упругого жаростойкого сильфона (температура рабочей среды от -10°C до $+150^{\circ}\text{C}$); 6, 16 – стягивающее винтовое соединение; 7 – стягивающий болт; 8 – паросборник; 9 – корпус; 10 – внешнее ферромагнитное ярмо; 11, 12 – катушка с обмоткой ВЭ; 13 – медные направляющие трубки; 14, 20, 21 – стягивающее болтовое соединение; 15 – упорные кольца; 17 – уплотнительные кольца; 18 – основание - конденсаторприёмник; 19 – защитная крышка ВЭ; 22, 23 – ВЭ с ферромагнитными сердечниками; 24 – испаритель с КТТ с мелкопористым фитилём; 25 – компенсаторная полость

При подводе тепла к испарителю давлением пара паровой канал и конденсатор освобождаются от жидкости, которая поступает в компенсаторную

полость. Объем компенсаторной полости и прилегающих к ней деталей таков, что она может полностью принимать эту жидкость [12, 15]. Поэтому, когда испаритель нагревается выше 30°C (303,15°K), вода испаряется. Этот пар быстро поднимается по паровому каналу к приёмнику тепла – конденсатору (рис.8). Когда тепло теряется в конденсаторе, пар конденсируется с образованием жидкости (воды) и возвращается по конденсаторопроводу в испаритель, чтобы еще раз повторить процесс. Таким образом, достигается термостабилизация рабочей МРЖ в коаксиальном канале МР-демпфера и его стабильная работа.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
2. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем / Р.М. Айбиндер [и др.] // Вестник машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 7–14.
3. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологического трансформатора / Б.А. Гордеев [и др.] // ПромИнжиниринг. – 2017. – С. 201-205.
4. К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – №2. – С. 15-21.
5. **Гордеев, Б.А.** Влияние температуры рабочей жидкости на динамические характеристики гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. – №12. – С. 22 – 26.
6. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологических трансформаторов энергетических установок / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, Е.А. Ершова // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб.ст. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, – 2016. – С. 51- 56.
7. **Актинов, А.А.** О стойкости магнитных жидкостей к воздействию повышенных температур / А.А. Актинов [и др.] // Физико-химические и прикладные проблемы МЖ: сб. науч. тр. – Ставрополь: СГУ, 1997.
8. **Шульман, З.П.** Магнитореологический эффект / З. П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184с.
9. **Башта, Т. М.** Машиностроительная гидравлика: справоч. пособие / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 672.
10. **Яворский, Б.М.** Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1964. – 847с.
11. **Дан, П. Д.** Тепловые трубы: [пер. с англ.] / П.Д. Дан, Д.А. Рей. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
12. **Алексеев, В. А.** Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Алексеев, В.А. Арефьев. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
13. **Ивановский, М. П.** Технологические основы тепловых труб / М.П. Ивановский [и др.]. – М.: Атомиздат, 1980. – 160 с.
14. **Елисеев, В. Б.** Что такое тепловая труба? / В.Б. Елисеев, Д.И. Сергеев. – М.: Энергия, 1971. – 136 с.
15. **Майданик, Ю.Ф.** Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства // Биржа технологий и контактов. – 2003. – № 5.

16. **Афанасьев, В.Н.** Экспериментальное исследование процессов в “Контурных” тепловых трубах / В.Н. Афанасьев, А.В. Недайвозов, А.А. Якомаскин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – №2. – С. 44-61.

УДК 621.311

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.Н. Осмехин³, К.С. Степанов²

ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ГИДРООПОР МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

Институт проблем машиностроения Российской академии наук¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²
АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова»³

Повышение мощностей силовых энергетических установок электромеханических комплексов обуславливает необходимость совершенствования методов математического проектирования виброзащитных средств и внедрения новых технических решений при их разработке. Рассмотрены исходные положения, подходы и технология, сформулированные в виде этапов математического моделирования магнитоуправляемых гидроопор методом электроанalogий. Дан пример построения имитационной модели магнитоуправляемой гидроопоры как электромеханической системы на основе метода электроанalogий.

The increase in the capacity of power power plants of Electromechanical complexes causes the need to improve the methods of mathematical design of vibration protection means and the introduction of new technical solutions in their development. The article considers the starting position, approaches, and technology mathematical modeling of magnetorheological transformer hydro-par method electrorloge. An example of simulation gidropony as a mechanical system based on the method of electrorloge.

Ключевые слова: магнитореологический трансформатор, гидроопора, дроссельные каналы, магнитореологическая жидкость, математическое моделирование, метод электроанalogий, электромеханические аналогии.

Key words: magnetorheological transformer, hydro bearing, throttle channels, magnetorheological fluid, mathematical modeling, method of elektroanlagen, Electromechanical analogy.

Введение

Магнитоуправляемые гидроопоры обладают не только механической, но и электрической (электромагнитной) энергией, сосредоточенной в элементах её механической цепи (инерционной массы нагрузки, резинометаллической обечайки, магнитогидравлическом трении рабочей жидкости) и в элементах электрической цепи МРТ (индуктивности, конденсаторе и резисторе).

В работе [1] была изложена концепция расчета обычных гидроопор на основе аналогии электрических четырехполюсников. В данном случае работа обычной гидроопоры идентифицировалась с работой электрических узлов в радиоприемных устройствах: (усилителях, аттенюаторах, фильтрах). По своему назначению она относится к пассивным системам виброзащиты.

Магнитоуправляемые гидроопоры относятся к активным системам виброзащиты и её некоторые элементы взаимодействуют между собой. Для описания данного процесса взаимодействия элементов гидроопоры приходится составлять и решать систему уравнений, содержащую уравнения механики, гидравлики и теории электромагнитного поля. Решение системы уравнений получается громоздким. Поэтому, для упрощения решения задач, связанных с разработкой и проектированием магнитоуправляемых гидроопор наиболее подходит метод электромеханических аналогий, позволяющими свести анализ гидроопор к анализу эквивалентных электрических цепей и схем. Математический аппарат для анализа электрических цепей хорошо разработан и широко известен инженерам электрикам и радиоинженерам.

1. Модель - макет виброзащитного демпфера – разборная магнитоуправляемая гидроопора ОГ-95 для демпфирования ударных нагрузок

Основным аспектом проектирования виброзащитных систем для мобильных электромеханических комплексов и энергетических установок является согласование частотных характеристик системы активной виброзащиты и возбудителей, что позволяет избегать нежелательных резонансных колебаний. Этому требованию в полной мере удовлетворяют магнитоуправляемые гидроопоры нового поколения, объединяющие в себе упругий резиновый элемент и магнитогидравлический гаситель колебаний с магнитореологической жидкостью (МРЖ).

В качестве физической модели данной гидроопоры (рис. 1) выбран макет виброзащитного демпфера, опоры магнитогидравлическая (ОМГ–95) для демпфирования периодических ударных нагрузок или стационарных вибропроцессов, и имеющий два управляемых индукционных щелевых дроссельных канала, в которых МРЖ возбуждается переменным магнитным полем.

За основу разработки модели магнитоуправляемой гидроопоры взята гидроопора ГО–90, разработанная в ИПМ РАН [1 - 5], так как она по своим массогабаритным показателям наиболее универсальна при дальнейшем ее совершенствовании и расширении функциональных возможностей.

Здесь использована разъемная конструкция с одним возбуждающим электромагнитом (ВЭ) и двумя щелевыми дроссельными каналами, соединяющими рабочую и компенсационную камеры гидроопоры. Эскиз разъемной конструкции данной гидроопоры представлен на рис. 1.

В модели виброзащитного демпфера ОМГ–95 два щелевых дроссельных канала с МРЖ возбуждаются магнитными полями в пространстве полюсов магнитопровода возбуждающего электромагнита 8 (рис. 1) [1 - 5].

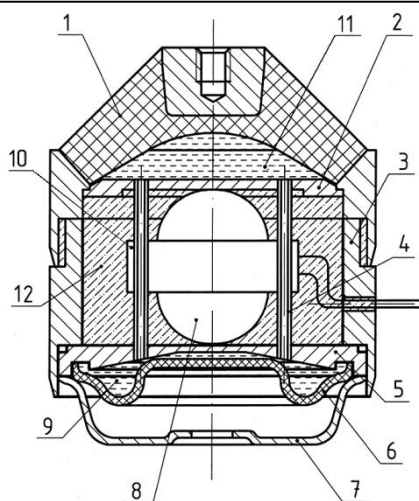


Рис. 1. Эскиз управляемого магнитным полем двухканального демпфера ОМГ–95 для демпфирования ударных нагрузок:

1 – упругая резиновая обечайка с завулканизированной опорной платой, верхним основанием для крепления демпфируемого объекта; 2 и 5 – несущие жесткие диамагнитные перегородки; 3 – корпус; 4 – диамагнитные дроссельные каналы; 6 – гофрированная мембрана; 7 – нижнее основание, поддон для крепления опоры; 8 – катушка ВЭ; 9 – нижняя компенсационная камера; 10 – магнитопривод; 11 – верхняя рабочая камера; 12 – элементы крепления МРТ

Процесс основан на том, что силовые линии магнитного потока из магнитных полюсов ВЭ 8 проходят через индукционные щелевые дроссельные каналы 4 с МРЖ, изменяя её вязкость [1 - 5]. В результате в дроссельных каналах изменяется течение самой МРЖ вследствие возникающего гидравлического вязкого сопротивления рабочей жидкости. Изменение объемов полостей с жидкостью происходит за счет деформации эластичной резиновой обечайки гидроопоры. В качестве компонентов трения выступают конструктивное трение в резине и гидравлическое вязкое сопротивление рабочей жидкости.

Демпфирование колебаний в опоре (рис. 1) происходит за счет деформации упругой обечайки 1, внутреннего трения слоев МРЖ при движении в дроссельных каналах и сил инерции колеблющейся рабочей МРЖ в жидкостных объемах опоры 9. Движение МРЖ в дроссельных каналах обусловлено деформацией упругой гофрированной мембраны 6. Изменение вязкости МРЖ в управляемых индукционных дроссельных каналах 4 обусловлено влиянием управляющего магнитного поля. При этом приведенная масса рабочей МРЖ в индукционных дроссельных каналах 4 гидроопоры превосходит реальную массу МРЖ в рабочей 11 и компенсационной 9 камерах.

Диссипация (рассеивание) энергии колебаний в магнитоуправляемых гидроопорах происходит во всех камерах и каналах заполняющей гидроопору МРЖ. При протекании МРЖ из рабочей камеры в компенсационную по дроссельным каналам возникает вязкое трение слоев рабочей жидкости. При этом выделяется тепловая энергия и совершается работа. Тепловая энергия далее рассеивается в окружающую среду через металлические корпусные детали магнитоуправляемой гидроопоры.

В управляемой двухканальной модели гидроопоры (рис. 1) ВЭ 8 четырёхполюсного МРТ в дроссельных каналах 4 создаёт электромагнитное поле и располагается внутри самой гидроопоры. На рис. 2 представлен эскиз и фотография МРТ управляемой двухканальной модели гидроопоры для демпфирования ударных и стационарных вибрационных нагрузок.

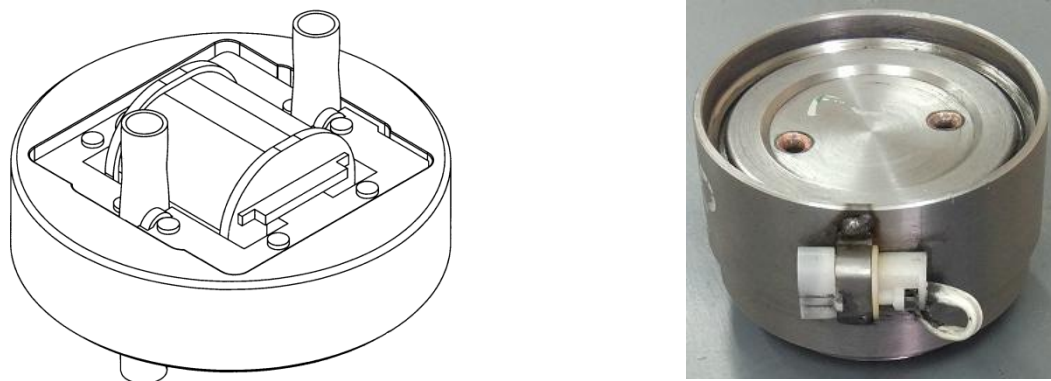


Рис. 2. Эскиз и фотография двухканального, управляемого магнитным полем виброзащитного демпфера ОМГ–95 для демпфирования ударных нагрузок и стационарных вибропроцессов с двумя дроссельными каналами и одним ВЭ

С помощью внешнего магнитного поля ВЭ в индукционных дроссельных каналах на рабочую МРЖ действуют объемные пондеромоторные силы, на несколько порядков превышающие силу тяжести. Эти силы и используются в работе магнитоуправляемой гидроопоры, увеличивая ее демпфирование.

В модели виброзащитного демпфера ОМГ–95 происходит формирование внутренних динамических свойств реактивного характера за счет ускоренного движения столбов рабочей жидкости и изменения её вязкости в дроссельных каналах под действием магнитного поля.

Технические решения, направленные на создание управляемого жидкостного магнитного демпфирования при разработке модели виброзащитного демпфера ОМГ–95, были отражены в конструкторско-технологической документации на физическую модель (макет) виброзащитного демпфера. Были разработаны чертежи и изготовлены основные составные детали и узлы макета – гидроопоры ОМГ- 95: опорной платы; обечайки; корпуса; дроссельной перегородки с возбуждающим электромагнитом; гофрированной мембраны; поддона; верхнего и нижнего стяжных колец. В результате была изготовлена в металле партия разборных интегральных гидроопор ОМГ- 95 для демпфирования ударных нагрузок и стационарными вибропроцессами с двухканальным четырёхполюсным ВЭ с управляемыми дроссельными каналами. Фотография управляемой гидроопоры ОМГ- 95, подготовленной к проведению виброиспытаний, представлена на рис. 3.

Разработаны чертежи оснастки и технологическая карта для изготовления гидроопор типа ОМГ-95, а также технологические карты по их сборке и заливке рабочей МРЖ [1 - 5].

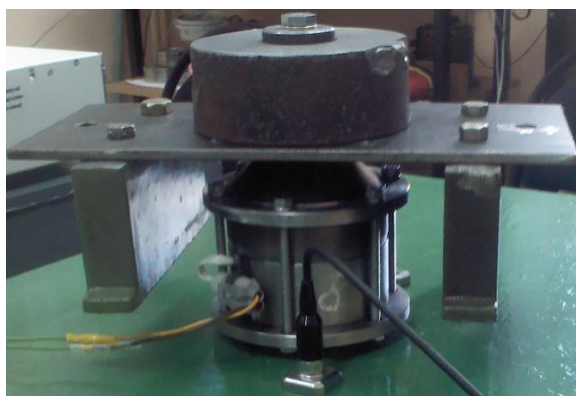


Рис. 3. Фотография гидроопоры ОМГ-95, подготовленная к проведению виброиспытаний

2. Применение метода электроаналогий при построении магнитоуправляемых гидроопор

Процессы, протекающие в электрических и механических системах, описываются математически одними уравнениями. В математической физике это телеграфные уравнения и уравнения колебаний струны в механике.

В отличие от механической энергии электрическая энергия передается в электрических цепях посредством ветвей, содержащих резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и др., а перераспределяется электрическая энергия между ветвями посредством узлов. Поэтому электрические процессы можно исследовать с помощью известных понятий: электрического тока, напряжения. Математическое описание электрических процессов часто совпадает с описанием процессов в объектах иной физической природы. В связи с этим появляется возможность заменить исследования в неэлектрических системах исследованиями явлений в электрических цепях [6 - 9]. В литературе сравниваются компонентные уравнения различных видов систем (табл. 1) и отмечается их динамическая аналогия [6 - 9].

Чтобы воспользоваться методом электроаналогий при разработке гидроопор, необходимо рассмотреть особенности этого метода, а также и подход к математическому моделированию гидроопор этим методом.

Законы электрических цепей математически выражаются скалярными функциями и в этом смысле не могут полностью заменить законы теоретической механики и гидравлики при моделировании гидроопор.

Концепция электроаналогий основана на том, что данный метод добавляет к законам теоретической механики и гидравлики законы электротехники.

Компонентные уравнения

Вид системы	Тип компонента		
	Инерционный	Диссипативный	Упругий
Механическая поступательная	$F_u = m \frac{dv_u}{dt}$	$F_\delta = \mu \cdot v_\delta$	$F_y = \frac{1}{\lambda} \int v_y dt$
Механическая вращательная	$M_u = J \frac{d\omega_u}{dt}$	$M_\delta = \mu \cdot \omega_\delta$	$M_y = \frac{1}{\lambda} \int \omega_y dt$
Гидравлическая	$P_u = m_z \frac{dQ_u}{dt}$	$P_\delta = \mu_z \cdot Q_\delta$	$P_y = \frac{1}{\lambda_z} \int Q_y dt$
Тепловая	–	$T_\delta = \mu_T \cdot \Phi_\delta$	$T_y = \frac{1}{C_T} \int \Phi_y dt$
Электрическая	$U_u = L \frac{di_u}{dt}$	$U_\delta = R \cdot i_\delta$	$U_y = \frac{1}{C} \int i_y dt$

Отметим основной аспект концепции метода электроаналогий. Он заключается в возможности применения для решения задач электротехники законов Кирхгофа. Они дают электрическим моделям значительное преимущество перед моделями иной физической природы, так как в других областях техники нет законов, полностью адекватных законам Кирхгофа. Это замечание, прежде всего, относится к механическим объектам, которые обычно представляют в виде структурно-кинематических схем. Кинематическая схема характеризует одновременно геометрию механизма и его движение, что затрудняет топологическое представление механических систем.

Применение метода электроаналогий к магнитоуправляемым гидроопорам приводит к новым решениям известных задач. Эти решения формализованы и предусматривают разделение сложных динамических систем на элементарные звенья трех видов: инерционные, диссипативные и упругие (табл. 1). В результате создается имитационная математическая модель, которая представляет собой совместную систему дифференциальных и линейных алгебраических уравнений.

Методом электроаналогий возможно решать кинематические и динамические задачи для систем виброзащиты с магнитоуправляемыми гидроопорами. Метод позволяет получить для данных гидропор универсальные и в то же время надежные решения так называемых обратных кинематических задач по положению, скорости и ускорению.

Основной подход к математическому моделированию магнитоуправляемых гидропор с использованием электромеханических аналогий сводится к последовательности действий:

1) разделить электромеханическую систему на отдельные механическую и электрическую подсистемы, включающие (каждая) одну сосредоточенную массу и одну индуктивность;

2) применяя принцип Даламбера, составить уравнения кинестатики для гидроопоры, определяющие движение тела с выделенной массой;

3) по таблице электроанalogий (табл. 1) выделить в механической системе гидроопоры инерционные, диссипативные и упругие элементы;

4) построить на основе полученных уравнений эквивалентные электрические схемы замещения гидроопоры;

5) на основе электрических схем гидроопоры записать уравнения по второму закону Кирхгофа и добавить их к уравнениям теоретической механики и гидравлики.

В данной статье рассматривается построение математических моделей магнитоуправляемых гидроопор простым методом с использованием электроанalogий.

3. Правила и пример построения модели гидроопоры с магнитореологическим трансформатором по методу электроанalogий

Чтобы воспользоваться методом электроанalogий применительно к магнитоуправляемой гидроопоре, рассмотрим правила и пример построения её простой математической модели, состоящей из двух подсистем:

– механической для неуправляемой гидроопоры с МРЖ, содержащей одну сосредоточенную массу;

– электрической для магнитоуправляемой гидроопоры, содержащей одну индуктивность.

Эквивалентную электрическую схему для магнитоуправляемой гидроопоры конструируют по следующим правилам:

1) внешние движущие силы представляют на электрической схеме для неуправляемой гидроопоры в виде источников тока или напряжения;

2) внутренним силам (силам сопротивления), действующим на отдельную сосредоточенную массу, отвечают напряжения между определенными точками электрической схемы. Чтобы показать полярность каждого из этих напряжений, к соответствующим двум точкам электрической схемы присоединяют прямоугольник, внутри которого изображают стрелку, обращенную к точке с положительным потенциалом;

3) скорость движения сосредоточенной массы нагрузки гидроопоры эквивалентна току в цепи с индуктивностью;

4) скорость деформации упругого элемента обечайки гидроопоры эквивалентна току в цепи с емкостью;

5) скорость движения рабочей жидкости гидроопоры – изменение вязкости рабочей МРЖ (её гидравлического коэффициента трения) эквивалентна току в цепи с активным сопротивлением;

6) индуктивности, конденсаторы, сопротивления, э.д.с, напряжения и токи на электрической схеме для магнитоуправляемой гидроопоры обозначают с помощью соответствующих символов, принятых в механике.

Для рассматриваемого примера построения математической модели магнитоуправляемой гидроопоры по методу электроанalogий получаем две подсистемы.

Первая механическая подсистема для неуправляемой гидроопоры с МРЖ включает нагрузку гидроопоры массой m_1 . На неё действует внешняя сила P_1 под действием которой нагрузка гидроопоры движется со скоростью V_1 . Силами сопротивления здесь являются инерционная сила $F_1^u = m\dot{V}_1$ нагрузки гидроопоры, сила упругости обечайки F_1^y , диссипативная сила F_1^d рабочей МРЖ в дроссельных каналах гидроопоры и сила $F_{um} = m_{um}(\ddot{x} - \ddot{V})$ – (внутренняя сила), созданная на относительных ускорениях приведенной массой m_{um} рабочей МРЖ в дроссельных каналах гидроопоры.

Используя метод кинестатики [6 - 9], уравнение равновесия указанных сил

$$P_1 - F_1^u - F_1^y - F_1^d - F_{um} = 0,$$

Оно служит основой для построения эквивалентной электрической схемы замещения магнитоуправляемой гидроопоры, представленной на рис. 4.

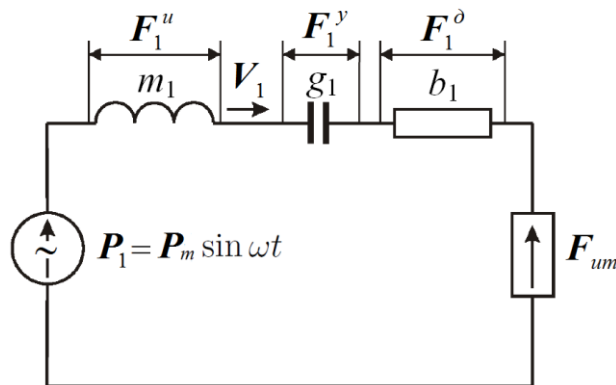


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема замещения неуправляемой гидроопоры:

P_1 - внешняя сила, Н; V_1 - скорость движения нагрузки, м/с; F_1^u - инерционная сила нагрузки, Н; F_1^y - сила упругости обечайки, Н; F_1^d - диссипативная сила рабочей МРЖ в дроссельных каналах, Н; F_{um} - сила от приведенной массы m_{um} рабочей МРЖ в дроссельных каналах, Н; m_1 - масса нагрузки, кг; g_1 - податливость обечайки, м/Н; b_1 - гидравлический коэффициент трения МРЖ [6 - 9]

Вторая электрическая подсистема магнитоуправляемой гидроопоры включает эквивалентную электрическую схему в виде последовательного коле-

бательного контура, для которого приняты обозначения: $L_{\text{э}}$ - индуктивности ВЭ; $C_{\text{мрт}}$ - добавочного конденсатора в системе управления, $R_{\text{кэ}}$ и $R_{\text{д}}$ - сопротивления катушки ВЭ и добавочного; E_1 - источника напряжения; U_1^L , $U_1^{\text{кэ}}$, U_1^C и $U_{\text{д}}$ - соответствующих напряжений; I_1 - ток в электрической схеме управления [6, 7].

Используя второй закон Киргофа [6], уравнение равновесия указанных выше напряжений U_1^L , $U_1^{\text{кэ}}$, U_1^C и $U_{\text{д}}$ имеет вид $E_1 - U_1^L - U_1^{\text{кэ}} - U_1^C - U_{\text{д}} = 0$. Оно служит основой для построения эквивалентной электрической схемы замещения схемы управления гидроопоры, представленной на рис. 5.

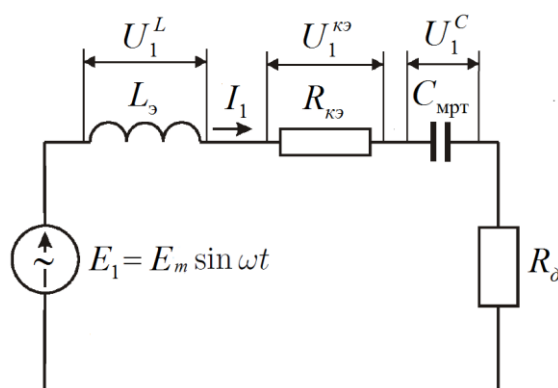


Рис. 5. Электрическая схема корректировки схемы управления гидроопоры с одним ВЭ и с последовательно подключённым конденсатором

Как видно из рис. 5, в схеме последовательного резонансного контура при резонансной частоте $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$ напряжения на индуктивности и емкости будут во столько раз больше входного, во сколько раз индуктивное сопротивление ωL , или емкостное $1/\omega C$, будут больше $(R_{\text{кэ}} + R_{\text{д}})$. Чем выше добротность данного контура, тем надежнее работа магнитоуправляемой гидроопоры, так как изменение вязкости рабочей МРЖ в дроссельных каналах происходит более эффективно.

Заключение

В статье показано построение математических моделей магнитоуправляемой гидроопоры и схемы ее управления с применением метода электроаналогий, приведены правила и пример построения модели гидроопоры с магнитореологическим трансформатором по данному методу. Преимущество рассмотренного метода электроаналогий заключается в том, что синтез имитационных моделей гидроопоры и схем управления сопровождается построением их эквивалентных электрических схем замещения. Поскольку эквивалентные электрические схемы замещения гидроопоры и схемы управления

содержат небольшое количество звеньев, то появляется возможность исследовать магнитоуправляемую гидроопору как динамическую систему с привлечением методов теории управления. Однако такое моделирование оправдано лишь для сравнительно простых систем, содержащих небольшое количество звеньев.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
2. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем / Р.М. Айбиндер [и др.] // Вестник машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 7–14.
3. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологического трансформатора / Б.А. Гордеев [и др.] // ПромИнжиниринг. – 2017. – С. 201-205.
4. Физические основы и конструкция индукционного магнитореологического трансформатора гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Прикладная механика и технология машиностроения. – 2011. – №2. – С. 52-68.
5. **Атабеков, Г. И.** Теоретические основы электротехники / Г. И. Атабеков. М. – Л.: Энергия. – 1966. – Ч.1. – 320 с.
6. **Бутенин, Н. В.** Курс теоретической механики / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – СПб. : Ланв. 2007. – 736 с.
7. **Бать, М. И.** Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 2. Динамика / М. И. Бать, Г. Ю. Джанелидзе. А. С. Келвзон. – М.: Наука, 1972. – 624 с.
8. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 1997. – 640 с.
9. **Зарубин, В. С.** Математическое моделирование в технике / В. С. Зарубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 496 с.

УДК 621.317

О.С. Хватов, Д.С. Кобяков, А.В. Крылов, М.Е. Юрлов**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЬ –
ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ**

Волжский государственный университет водного транспорта

Рассмотрена судовая единая электростанция (СЭС) с общим звеном постоянного тока и дизель–генератором (ДГ) переменной частоты вращения. Показано, что работа дизель–генераторной установки при постоянной (номинальной) частоте вращения, но переменной нагрузке характеризуется неоптимальным (завышенным) удельным расходом топлива. В то же время принудительное регулирование частоты вращения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в соответствии с величиной электрической нагрузки генератора позволяет обеспечить энергоэффективный режим генерирования электроэнергии. Одним из способов повышения энергетических показателей СЭС может быть перевод одного из параллельно работающих ДГ в режим переменной частоты вращения. При этом нагрузка между параллельно работающими ДГ распределяется пропорционально их частотам вращения, независимо от индивидуальной загрузки гребных электродвигателей. Для стабилизации напряжения ДГ, работающего в режиме переменной частоты вращения, используются силовой полупроводниковый преобразователь. Представлены функциональная схема и математическая имитационная модель судовой единой электростанции, графики переходных процессов при изменении нагрузки в канале электродвижения судна.

The ship's single power station (SES) with a common link of direct current and a diesel generator (DG) of variable speed are considered. It is shown that the operation of a diesel generator set at a constant (nominal) rotational speed but variable load is characterized by a nonoptimal (overestimated) specific fuel consumption. At the same time, forced regulation of the internal combustion engine (ICE) rotation speed in accordance with the electric load of the generator makes it possible to provide an energy-efficient mode of generating electricity. One way to improve the energy performance of SES can be to transfer one of the parallel operating DWs to a variable speed mode. In this case, the load between the parallel operating DWs is distributed in proportion to their rotation frequencies, regardless of the individual loading of the propulsion motors. To stabilize the DG voltage operating in the variable speed mode, a power semiconductor converter is used. Functional scheme and mathematical simulation model of ship single power station, graphs of transient processes with load changes in the channel of electromotion of the vessel are presented.

Ключевые слова: электростанция, электродвижение, звено постоянного тока, дизель – генератор переменной частоты вращения.

Key words: power station, electric motor, DC link, diesel generator of variable speed.

Состояние проблемы

В настоящее время в судостроении всё больше внимания уделяется гребным электрическим установкам (ГЭУ), которые имеют ряд преимуществ перед

установками с непосредственной передачей мощности от тепловых двигателей на винт: повышенные манёвренные качества, надёжность и живучесть судна, возможность отбора мощности от ГЭУ для вспомогательных нужд.

В Волжском государственном университете водного транспорта разрабатывается концепция новых пассажирских судов с использованием ГЭУ с колесно-двигательным рулевым комплексом. Суда планируется использовать на реках, где в настоящее время судоходство ограничено небольшими глубинами, например на Оке.

Опираясь на опыт эксплуатации судов проекта ПКС-40, одним из вариантов энергетической установки судна выбрано использование единой электростанции, содержащей два дизель - генератора (ДГ1, ДГ2) и являющейся общей как для питания гребной электрической установки, так и общесудовых потребителей. В качестве двигателей рассматриваются гребные колеса диаметром от 4,5 - 6 м, электродвигатели которых питаются от преобразователей частоты (ПЧ).

Эксплуатация судов проекта ПКС-40 показала их высокую экономичность и маневренность. Однако были выявлены и существенные недостатки:

- неравномерное и быстроизменяющееся распределение мощности между гребными электродвигателями при активном маневрировании;

- сложность включения генераторов на параллельную работу и распределения между ними активной мощности, связанное с наличием высших гармонических в сети при работе преобразователей частоты.

Практика показывает, что один из ДГ может быть загружен на 150 - 170% от номинальной мощности, а другой существенно недогружен. Для преобразователей частоты и электрических двигателей данные перегрузки являются допустимыми. Однако перегрузка генераторов может составлять не более 110 - 115% от их номинальной мощности.

Решение данной проблемы заключается в реализации так называемой псевдопараллельной работы генераторов, когда преобразователи частоты каналов электродвижения соединены на стороне постоянного тока. Такое решение было предложено авторами статьи в № 2 «Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технологии» за 2015 г. [2].

Научно обосновано и подтверждено экспериментально, что работа дизель-генераторной установки при постоянной (номинальной) частоте вращения, но переменной нагрузке характеризуется неоптимальным (завышенным) удельным расходом топлива. В то же время принудительное регулирование частоты вращения ДВС в соответствии с величиной электрической нагрузки генератора позволяет обеспечивать энергоэффективный режим генерирования электроэнергии [1, 3 - 5].

Постановка задачи

Авторами с целью повышения энергетических показателей СЭС предложен вариант ее структуры, когда один из параллельно работающих ДГ переводится в режим переменной частоты вращения (рис. 1). Принцип работы схемы

(рис. 1) заключается в принудительном регулировании частоты вращения ДВС2 при снижении нагрузки в канале электродвижения судна. Цель данного регулирования обусловлена поддержанием высоких энергетических показателей процесса генерирования электроэнергии за счет сохранения оптимального (близкого к номинальному) удельного расхода топлива ДВС.

При этом нагрузка между параллельно работающими генераторами СГ1 и СГ2 будет распределяться пропорционально их частотам вращения и независимо от индивидуальной загрузки гребных электродвигателей АД1 и АД2. Для стабилизации напряжения ДГ2, работающего в режиме переменной частоты вращения, используется повышающий трансформатор ТУ и широтно-импульсный преобразователь, реализованный на транзисторе Т3.

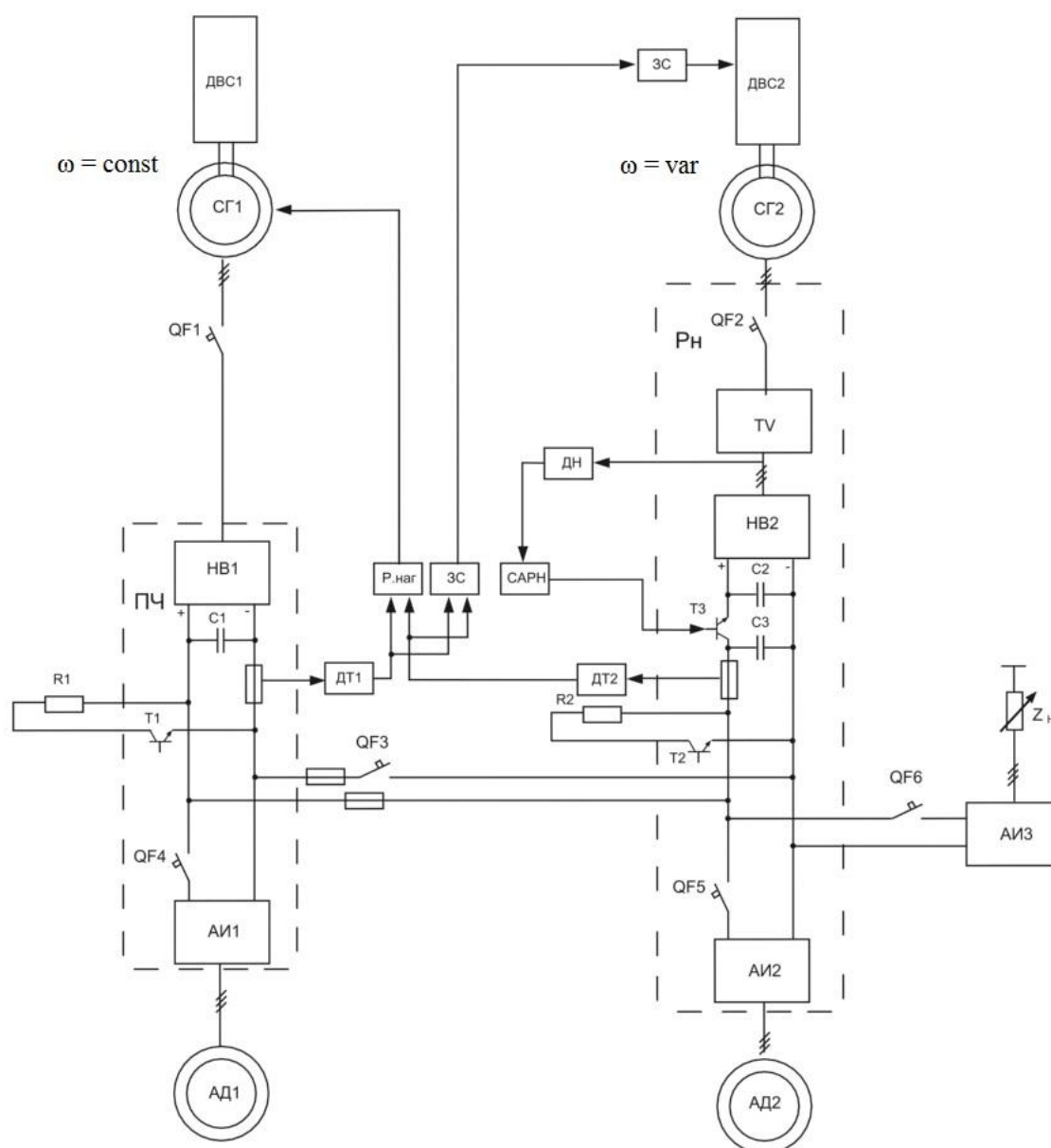


Рис. 1. Функциональная схема судовой единой электростанции с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором переменной частоты вращения

Преобразователи обоих ДГ соединены на стороне постоянного тока. Регулятор нагрузки $P_{\text{наг}}$ воздействует на систему возбуждения СГ1, изменяя величину напряжения на его статоре.

Методы и результаты исследования

Авторами разработана математическая имитационная модель двух параллельно работающих ДГУ. Функциональная схема данной модели изображена на рис. 1. Результаты имитационного моделирования динамических режимов при снижении нагрузки в канале электродвижения судна на 20% представлены на рис. 2 – рис. 4. Зависимости частот вращения ДГ1 и ДГ2 изображены на рис. 2. При снижении на 20-й секунде нагрузки на гребные электродвигатели система регулирования снижает частоту вращения ДГ2 до 80% от номинальной, при этом регулятор нагрузки $P_{\text{наг}}$ увеличивает напряжение на выходе СГ1, а распределение нагрузки между ДГ1 и ДГ2 происходит пропорционально их частотам вращения и независимо от величин нагрузок на гребные электродвигатели. На рис. 3 представлены зависимости напряжений на выходе выпрямителя НВ1 ($U_{\text{НВ1}}$) и ШИП – преобразователя ($U_{\text{ШИП}}$). Зависимости изменения токовой загрузки генераторов СГ1 и СГ2 приведены на рис. 4.

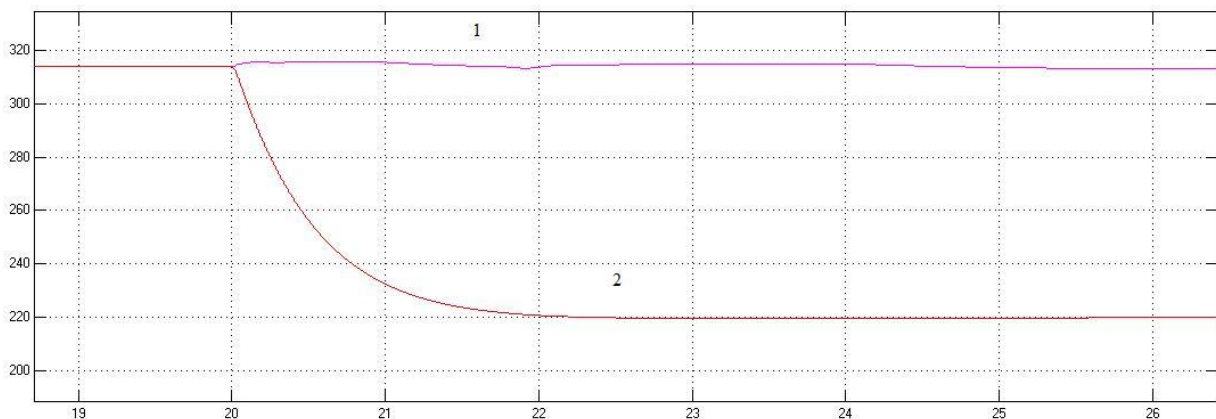


Рис. 2. Зависимости частоты вращения ДГ1 (1) и ДГ2 (2) при снижении нагрузки в канале электродвижения

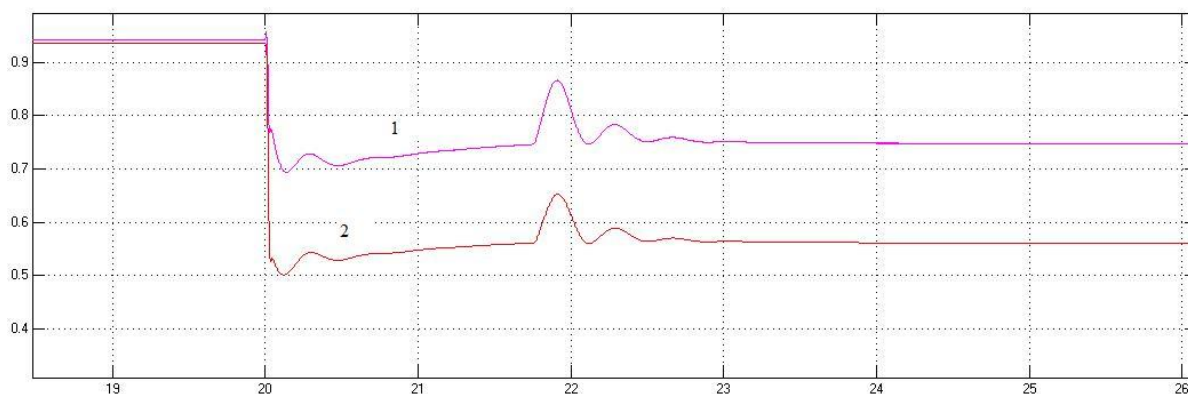


Рис. 3. Зависимости $U_{НВ1}$ и $U_{ШИП}$ при снижении нагрузки в канале электродвижения

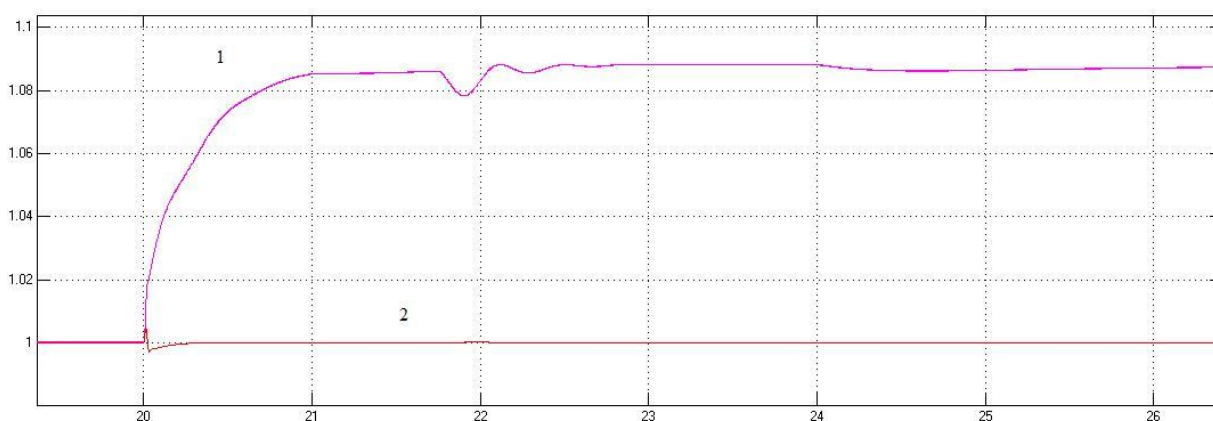


Рис. 4. Зависимости $I_{СГ1}$ и $I_{СГ2}$ при снижении нагрузки в канале электродвижения

Также для обеспечения стабильного выходного напряжения дизель-генераторной установки при прямом пуске асинхронного двигателя целесообразно использовать буферный накопитель энергии (БНЭ). В качестве накопителя может служить либо аккумуляторная батарея, либо суперконденсатор. Буферный накопитель подключается к звену постоянного тока ГЭУ. В данной работе рассматриваются переходные процессы при наличии и отсутствии БНЭ в составе ДГУ, работающей с переменной частотой вращения. На рис. 5 представлены осциллограммы имитационного моделирования напряжения звена постоянного тока ДГУ. Из рис. 5 видно, что БНЭ обеспечивает стабилизацию напряжения ДГУ при прямом пуске асинхронного электродвигателя.

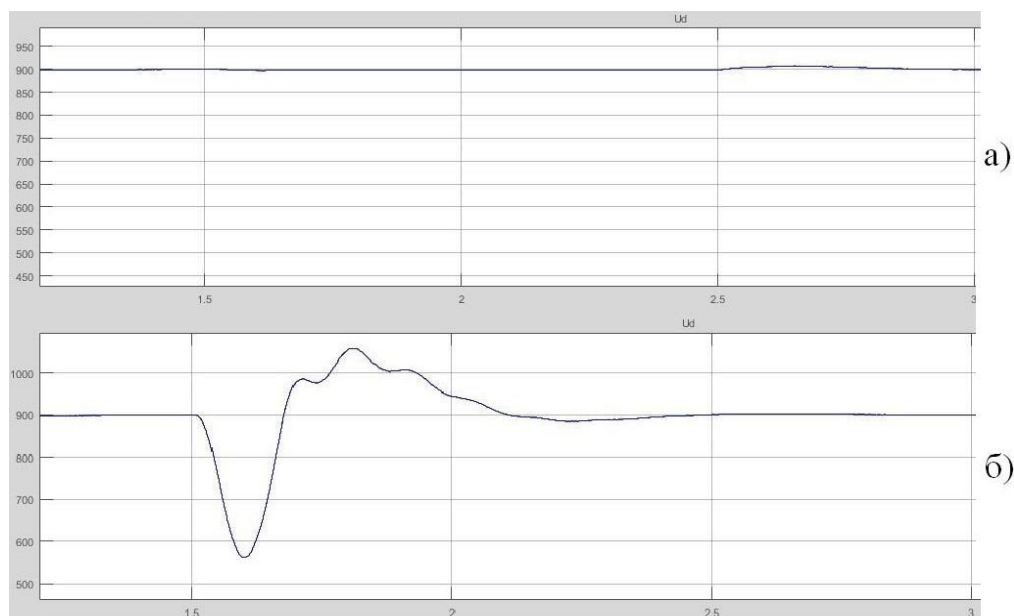


Рис. 5. Графики напряжения звена постоянного тока ДГУ с переменной частотой вращения:
a – с БНЭ; *б* – без БНЭ

Заключение

Предложена структура системы параллельной работы дизель-генераторных агрегатов в составе электростанции судна с электродвижением. С целью повышения энергетических показателей СЭС показана целесообразность перевода одного из ДГ агрегатов в режим переменной частоты вращения. Разработана математическая имитационная модель динамических режимов параллельной работы ДГ агрегатов постоянной и переменной частоты вращения.

Библиографический список

1. **Хватов, О.С.** Дизель - генераторная электростанция переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. – 2014. – №3. – С. 28 – 32.
2. Вариант единой электростанции колесного судна с электродвижением. / Е.М. Бурда [и др.] // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. – 2016. – №2. – С. 102-108.
3. **Хватов, О.С.** Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель - генераторной установки переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. – 2016. – №3. – С. 35 – 40.
4. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: монография / О.С. Хватов, А.Б. [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – С. 172.
5. **Хватов, О.С.** Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – №1(71). – С. 47 – 50.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов^{1,2}, А.А. Кралин¹, Д.А. Кудряшов^{1,2}, Е.Н. Александрова¹

БЕСКОНТАКТНЫЙ СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНЕШНИМ РОТОРОМ И КОЛЬЦЕВОЙ ОБМОТКОЙ ЯКОРЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова»²

Рассмотрена простая и технологичная конструкция бесконтактного двигателя постоянного тока с внутренним статором и внешним ротором с постоянными магнитами, которая подходит для использования в электроприводах с невысокими требованиями по электромеханической постоянной времени, например, в вентиляторных установках.

The simple in design and manufacturing concept of brushless permanent magnet DC motor with inner stator and outer rotor is considered. Applicable for electric drives without high demands on electromechanical time constant, for example, in fan-driven installations.

Ключевые слова: бесконтактный двигатель постоянного тока, кольцевая обмотка якоря, внешний ротор, датчик Холла, постоянные магниты.

Key words: brushless DC motor, armature's ring winding, outer rotor, Hall sensor, permanent magnets.

Из теории электрических машин и синхронного привода хорошо известно, что обмотки высокооборотных двигателей и генераторов должны иметь минимальное число полюсов, в пределе - два. При этом для двухполюсных машин может оказаться рациональной не традиционная барабанная обмотка, а кольцевая, аналогичная тем, которые стали известны ещё на заре промышленного электромашиностроения в XIX в., благодаря изобретениям А. Пачинотти и З. Грамма [1]. ЭДС в таких обмотках наводится только в одной – внешней стороне секций, что является серьёзным недостатком, так как вдвое снижает использование обмоточной меди. Кроме того, изготовление кольцевого якоря встречает технологические сложности, поскольку при укладке обмотки требуется пропускать провод через отверстие магнитопровода. Имеются сложности и при креплении кольцевого якоря на валу.

Несмотря на это, кольцевая обмотка якоря имеет важное конструктивное преимущество: длина вылета её лобовых частей машины не зависит от числа полюсов. Кроме того, в определённых случаях конкретного применения, кольцевые обмотки обладают следующими достоинствами:

- имеют малую длину лобовых частей и габаритную осевую длину;
- обеспечивают плотное прилегание к магнитопроводу, что создаёт благоприятные условия для интенсивного теплоотвода;
- обладают высокой механической прочностью, в частности при воздействии коротких замыканий;

- позволяют разместить катушечные группы фаз по разным пазам, не подвергая их пазовую изоляцию воздействию линейных напряжений.

Повысить удельные моментные характеристики в машинах с отсутствием жёстких требований к электромеханической постоянной времени (вентиляторы, генераторы) можно, увеличив диаметр воздушного зазора между статором и ротором. Проще всего это можно осуществить, поменяв местами статор (неподвижную часть машины) и ротор (подвижную её часть), и разместив первый внутри второго (рис. 2). Тогда, в соответствии с выражением, вытекающим из уравнения для машинной постоянной (Арнольда) [2],

$$D^3 = \frac{C_k M}{AB_\delta} \quad (1)$$

при тех же характеристиках обмотки, электромагнитных нагрузках и примерно одинаковых габаритах получим больший электромагнитный момент. Здесь D – диаметр зазора между статором и ротором; C_k – конструктивная постоянная, зависящая от соотношения размеров машины и параметров её обмотки; A и B_δ – электромагнитные нагрузки и линейная индукция в зазоре соответственно.

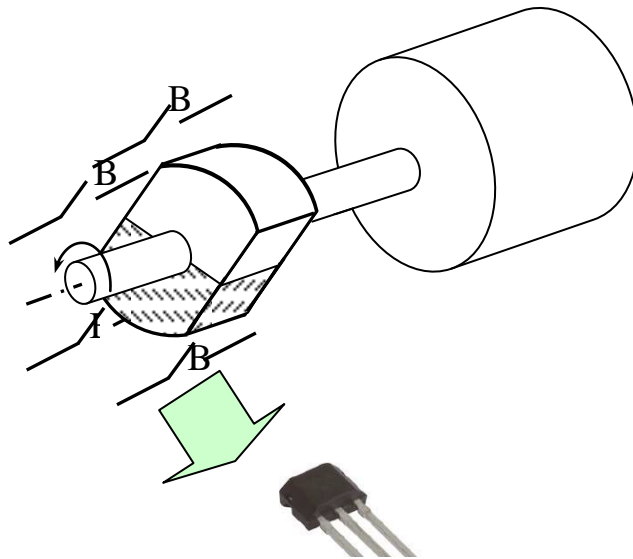


Рис. 1. Датчик Холла

Для обеспечения бесконтактности на внешнем роторе устанавливают постоянные магниты. При внешнем роторе их удобно наклеить на внутреннюю поверхность его магнитопровода, что существенно снижает требования к механической прочности соединения.

Статор внутри ротора с двух- трёх- или четырёхфазной катушечной обмоткой, получает питание от преобразователя частоты. Секции его обмотки переключаются по сигналам датчика положения на элементах Холла (рис. 1, чис-

ло датчиков равно числу секций обмотки или удвоенному числу секций, при разнополярном управлении).

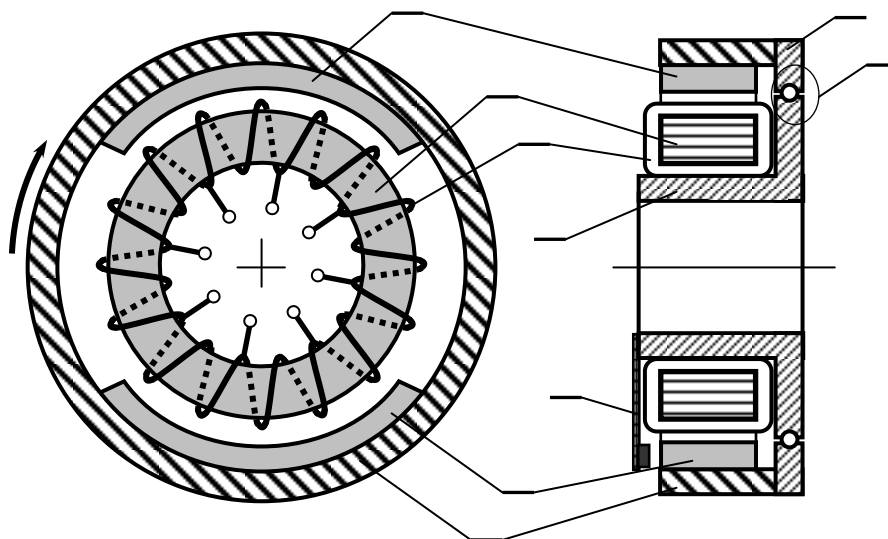


Рис. 2. Вентильный двигатель постоянного тока (обращённой конструкции)

Двигатель (рис. 2) содержит внутренний статор *1* с кольцевой обмоткой якоря *2* и внешний ротор с постоянными магнитами *3* и *4* “северного” и “южного полюсов”, и магнитопроводом *5*. Конструктивными элементами двигателя являются внутренний корпус *6* и фланец *7* ротора, между которыми помещён подшипниковый узел *8*. Датчики положения на элементах Холла закреплены на пластине *9*. Они взаимодействуют с торцевым полем магнитов ротора.

Преимуществами конструкции являются:

- небольшая осевая длина вследствие очень компактных лобовых частей и хороший теплоотвод от проводов обмотки;
- простота и технологичность конструкции при изготовлении единичных (опытных) и серийных образцов за счёт удобного восприятия центробежных усилий, действующих на магниты; простой геометрической формы магнитопроводов и возможности изготовления их без штамповки;
- хороший доступ к магнитам ротора для размещения датчиков положения;
- возможность сохранения работоспособности с некоторым ухудшением энергетических показателей, в случае выхода из строя транзисторов одного или двух каналов управления (фаз) преобразователя.

Вместе с тем, изображённая машина требует проработки конструкции подшипниковых узлов и технологии крепления магнитопровода с обмоткой якоря на внутреннем статоре.

Секции обмотки якоря включаются и отключаются посредством инвертора на транзисторах *V1-V16* (рис. 3) по сигналам чувствительных элементов ЧЭ на датчике Холла (рис. 4, *W* – секция обмотки якоря).

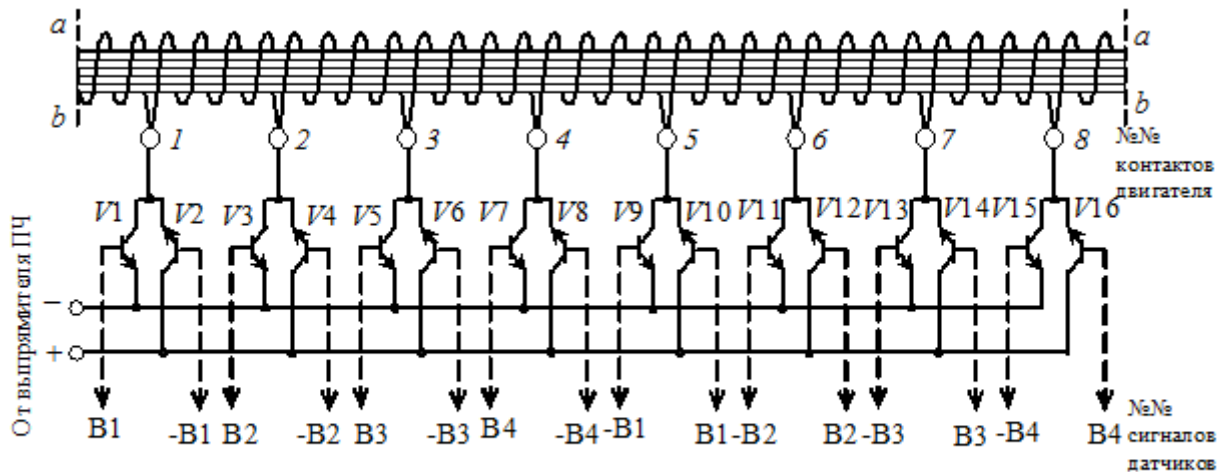


Рис. 3. Подключение вентильного двигателя к преобразователю

Алгоритм включения и отключения транзисторов по сигналам датчика построен таким образом, что каждый момент времени включённым оказывается один транзистор из группы, соединённой с положительной шиной выпрямителя, и один транзистор из группы, соединённой с отрицательной шиной выпрямителя. При этом смежные транзисторы каждой группы коммутируются: один в каждой из них отключается, разрывая цепь питания секции, как при сбегавшей пластине коллектора. Другой транзистор, смежный с включённым транзистором в каждой группе включается, подавая напряжение противоположного направления, как в набегавшей пластине коллектора обычной машины постоянного тока.

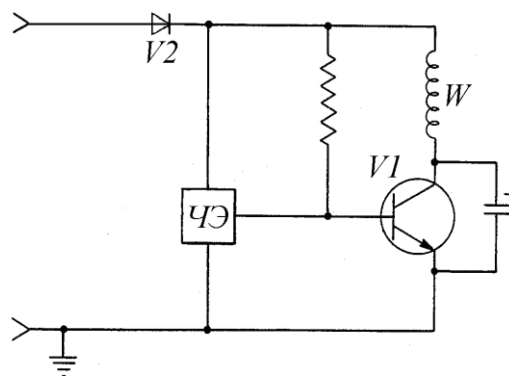


Рис. 4. Схема включения-выключения секции обмотки якоря по сигналам чувствительного элемента (ЧЭ) датчика (Холла)

Рабочие и механические характеристики рассмотренного двигателя аналогичны характеристикам двигателей постоянного тока независимого возбуждения. А именно, механическая характеристика будет обладать большой жёсткостью, не подверженной влиянию значительного индуктивного сопротивления обмотки и реакции якоря.

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	20	355	450	550
$B_r, \text{Тл}$	0,9	0,72	0,64	0,56
$H_{CB}, \text{кА/м}$	680	512	376	210

Примечание: B_r – остаточная индукция, H_{CB} – коэрцитивная сила на кривой размагничивания ферромагнитного материала по индукции.

Высокие удельные показатели этих двигателей обеспечиваются наличием постоянных магнитов с широкой петлёй гистерезиса на основе сплавов редкоземельных металлов: неодима или самарий - кобальта. При этом последние обладают высокой температурной и временной стабильностью. В частности, весьма широко освоенные в производстве и в изделиях магниты марки КС25ДЦ производства ООО “ПОЗ-Прогресс” (ГОСТ 21559-76 и ТУ48-4/0531-6-092), г. Верхняя Пышма Свердловской обл., сохраняют работоспособность при температурах до 550°C , обеспечивая многолетний ресурс, подтверждённый практикой длительной эксплуатации изделий на объектах. Характеристики магнита из сплава этой марки в зависимости от температуры представлены в табл. 1. При этом после нагрева до приведённых в таблице температур магнитные характеристики восстанавливаются.

Оценить допустимость нагрева двигателя и его изоляции можно через удельную тепловую нагрузку A_J [3]:

$$A_J = \frac{1140 P_m}{[1 + 0,004 (T_{\text{гор}} - 20)] \pi D_s l_{\text{cp}}}, \quad (2)$$

где P_m – потери в меди обмотки статора; D_s – диаметр внутреннего статора; l_{cp} – средняя длина витка.

Для изоляции класса нагревостойкости F допускается значение A_J не более $1500-2000 \frac{\text{А}^2}{\text{м} \cdot \text{мм}^2}$. При использовании проводов с изоляцией классов нагревостойкости B и H допустимые значения корректируются умножением на поправочный коэффициент 0,75 и 1,3 соответственно.

Проработка конструкции двигателя с внешним ротором и кольцевой обмоткой на внутреннем статоре, несомненно, может стать одним из интересных направлений конструкторских разработок в электромеханике, основанным на использовании современных магнитотвёрдых материалов и изделий преобразовательной техники и ранних технологий изготовления обмоток и магнитопроводов электрических машин.

Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
2. **Смирнов, А.Ю.** Электромеханика. Основы теории и вычислительный анализ электрических машин: учеб. пособие / А.Ю. Смирнов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 290 с.
3. **Гольдберг, О.Д.** Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С.Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Выс. шк., 198. – 431 с.

УДК 621.365.5

Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB

Уфимский государственный авиационный технический университет

Приведено описание индукторов, применяющихся в установках индукционного нагрева. Рассмотрены основные способы компьютерного моделирования индукторов, применяющихся в комплексах для индукционного нагрева. Созданы модели индукторов при их совместной работе с источником питания в программном комплексе *Matlab*. Получены осциллограммы тока и потокосцепления индуктора с учетом насыщением сердечника.

The inductors used in induction heating devices are described. We considered the main methods of computer simulation of inductors used in induction heating complexes. Models of inductors are created in the Matlab software when they work together with a power supply. We obtained oscillograms of the current and flux linkage of the inductor, taking into account the saturation of the magnetic core.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, *Matlab*, моделирование.

Key words: induction heating, inductor, Matlab, modeling.

Индукторы, применяющиеся в составе индукционных установок, часто представляют собой одно- или многовитковую катушку из полого медного провода с водяным охлаждением. При подключении их к высокочастотному источнику питания они обтекаются переменным током повышенной, высокой и в ряде случаев промышленной частоты, благодаря чему обеспечивается возникновение магнитного поля с конфигурацией, определяемой параметрами и конструкцией индуктора.

При проектировании индукционных нагревательных установок одним из наиболее рациональных способов определения их параметров является компьютерное моделирование в программном комплексе *Matlab* ввиду того, что аналитический расчет, связанный с непосредственным решением систем дифференциальных уравнений при учете особенностей выходных параметров источника питания, нелинейности магнитопровода индуктора (при наличии), влияния индуктора на источник питания и т.д., представляет собой сложную задачу, а известные методики инженерного расчета связаны с принятием различных допущений, снижающих точность таких расчетов.

При моделировании в программном комплексе *Matlab* индукторы, совместно работающие с источниками питания, могут быть реализованы двумя способами [1]:

- использованием блоков линейных элементов – активного сопротивления, индуктивности;
- решением системы уравнений электромагнитных процессов в индукторах.

При моделировании индукторов по первому способу с помощью блоков активно - индуктивного сопротивления может быть реализована электрическая схема индуктора, работающего совместно с моделью источника питания, однако при использовании индукторов с магнитопроводами более точным является второй способ, позволяющий учитывать нелинейную характеристику намагничивания сердечника.

На рис. 1 приведена компьютерная модель источника питания для индукционного нагрева, состоящая из преобразователя частоты и индуктора, состоящего из активного сопротивления R_n и индуктивности L_n [2]. Значения этих величин определяются расчетным путем. Модель собрана при помощи блоков библиотек *Simulink* и *Power Systems*. За счет использования только двух элементов данный способ характеризуется простотой, возможностью быстрой проверки рассчитанных параметров индуктора и определения основных параметров индукционных установок с заданными параметрами индуктора.

При реализации второго способа моделирования индукторов при помощи блоков библиотек *Simulink* и *Power Systems* может быть решена система дифференциальных уравнений электромагнитных процессов индуктора, в том числе с учетом наличия нелинейного сердечника.

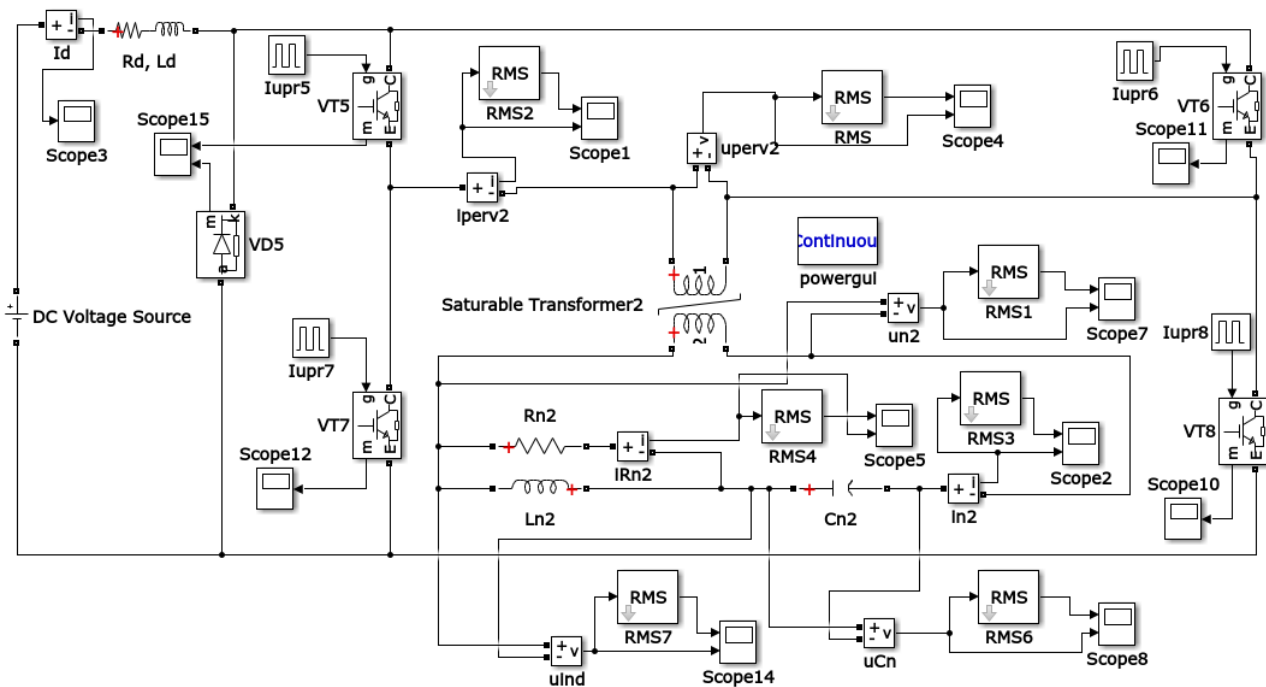


Рис. 1. Модель индукционной установки

Система дифференциальных уравнений индуктора может быть записана в следующем виде (без учета активного сопротивления индуктора) [1]:

$$\begin{cases} U_{\text{и}} = \frac{d\psi}{dt} = L_{\text{и}}(\psi) \cdot \frac{di_{\text{и}}}{dt}; \\ \psi = \int U_{\text{и}} \cdot dt; \\ i_{\text{и}} = \frac{\psi}{L_{\text{и}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{\text{и}}$ – напряжение на индукторе, В; ψ – потокосцепление, Вб; $L_{\text{и}}$ – индуктивность индуктора, Гн; $i_{\text{и}}$ – ток индуктора, А.

Характеристика намагничивания сердечника индуктора в виде зависимости потокосцепления от тока может быть задана различными способами. На рис. 2 представлен фрагмент модели индукционной установки в виде подсистемы, моделирующей индуктор, в соответствии с системой уравнений (1) [1]. Модель работает следующим образом: с помощью блока *Voltage Measurement* измеряется напряжение на зажимах индуктора, в блоке *Integrator* производится интегрирование значения напряжения, далее сигнал подается на вход таблицы *Look-Up Table*, в которой реализована нелинейная характеристика намагничивания магнитопровода. На основе значения потокосцепления (интеграл напряжения) на выходе таблицы формируется *Simulink* - сигнал мгновенного значения тока индуктора. Для возможности подключения модели к остальным блокам источника питания, собранным на базе блоков библиотеки *Power Systems*, при помощи блока управляемого источника тока *Controlled Current Source* на выходе подсистемы генерируется ток индуктора с возможностью подключения источника к модели установки.

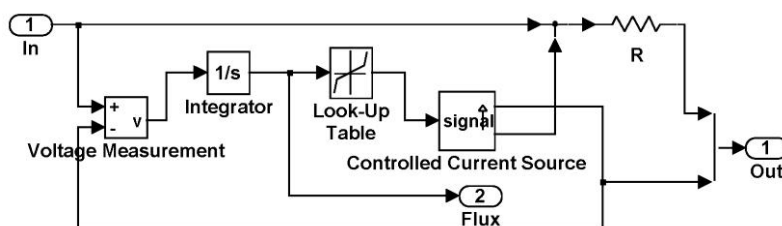


Рис. 2. Модель индуктора

Вместо введения блока таблицы со значениями точек характеристики намагничивания сердечника (кусочно-линейная аппроксимация) может быть использована аппроксимация кривой намагничивания в виде математического выражения (рис. 3) [3].

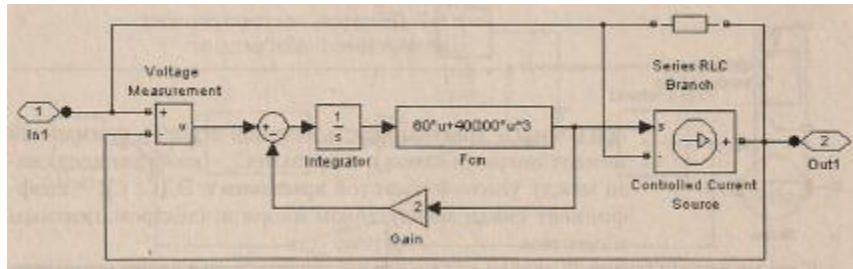


Рис. 3. Модель индуктора на основе аппроксимации кривой намагничивания в виде математической формулы

На рис. 4 и рис. 5 показаны осциллограммы, полученные по результатам моделирования индуктора по рис. 2.

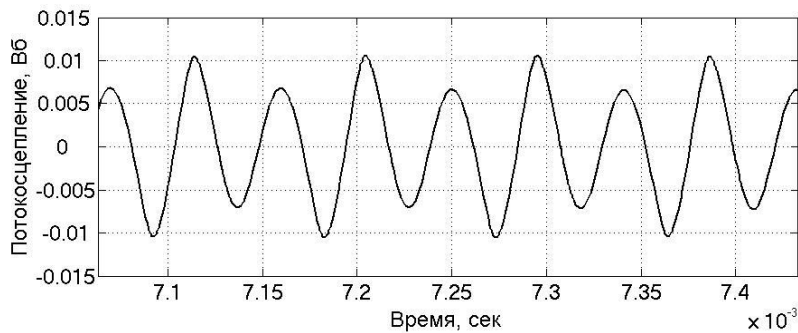


Рис. 4. Осциллограмма потокосцепления

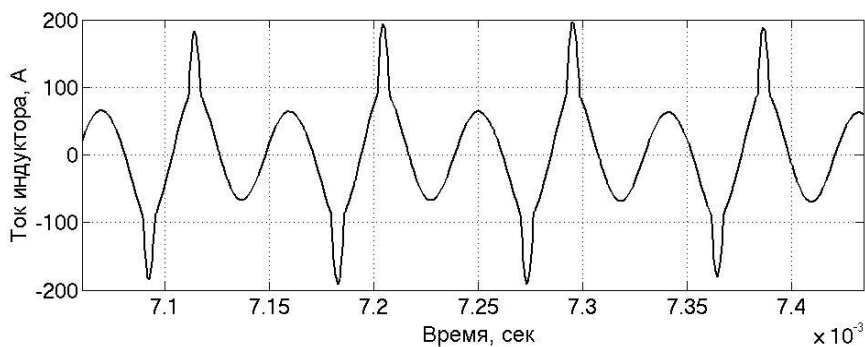


Рис. 5. Осциллограмма тока индуктора

Как видно из рис. 4, рис. 5 при значительном увеличении потокосцепления в индукторе возникает насыщение магнитопровода, в результате чего ток, потребляемый индуктором, искажается и увеличивается по амплитуде более чем в два раза.

Библиографический список

1. **Рогинская, Л. Э.** Расчет ферромагнитных модулей преобразовательных устройств / Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов. – Уфа: УГАТУ, 2016.
2. **Рогинская, Л. Э.** Трансформаторно-индукторный комплекс с последовательным включением конденсатора в цепь нагрузки / Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №6.
3. **Черных, И. В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

УДК 621.314.223

Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОТРАНСФОРМАТОРА И НАГРУЗКИ
НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЕГО ВКЛЮЧЕНИИ**

Уфимский государственный авиационный технический университет

Произведено исследование динамических режимов при включении в работу однофазного автотрансформатора, используемого для питания выпрямительного моста, подключенного к активной и активно-индуктивной нагрузке. Произведен анализ влияния учета реальных параметров автотрансформатора на длительность и величины параметров преобразователя во время переходных процессов при его включении под нагрузкой.

The article studies dynamic modes when switching on a single-phase autotransformer used to supply a rectifying bridge, connected to an active and active-inductive load. An analysis is made of the effect of taking into account the real parameters of the autotransformer on the duration and the values of the parameters of the converter during the transient processes when it is switched on under load.

Ключевые слова: автотрансформатор, трансформатор, выпрямитель, динамический режим, переходной процесс.

Key words: autotransformer, transformer, rectifier, dynamic mode, transient.

В настоящее время автотрансформаторы достаточно широко применяются для питания мощных промышленных и лабораторных потребителей и преобразователей переменного тока ввиду известных преимуществ автотрансформаторов перед силовыми трансформаторами [1]. В качестве нагрузок таких автотрансформаторов могут быть мощные выпрямительные установки, оборудование подстанций, оборудование электроэнергетических систем, электрические машины и т.д. При включении автотрансформаторов возникают переходные процессы, которые могут сопровождаться значительными бросками потребляемого тока, поэтому важной задачей является не только расчет переходных процессов при включении, но и определение степени влияния параметров автотрансформаторов, а также характера и величины нагрузки на динамический режим при включении автотрансформатора.

Одним из наиболее рациональных способов проведения подобных исследований является моделирование работы автотрансформаторов в программном комплексе *Matlab*. Использование библиотек *Simulink* и *Power Systems* позволяет производить решение систем дифференциальных уравнений с определением основных параметров устройств без выполнения сложных аналитических рас-

четов. В качестве примера рассмотрим работу однофазного автотрансформатора на полупроводниковый выпрямитель, питающий активную и активно-индуктивную нагрузку. На рис. 1 приведена компьютерная модель однофазного понижающего выпрямительного автотрансформатора с учетом магнитной характеристики сердечника [2]. Коэффициент трансформации равен двум.

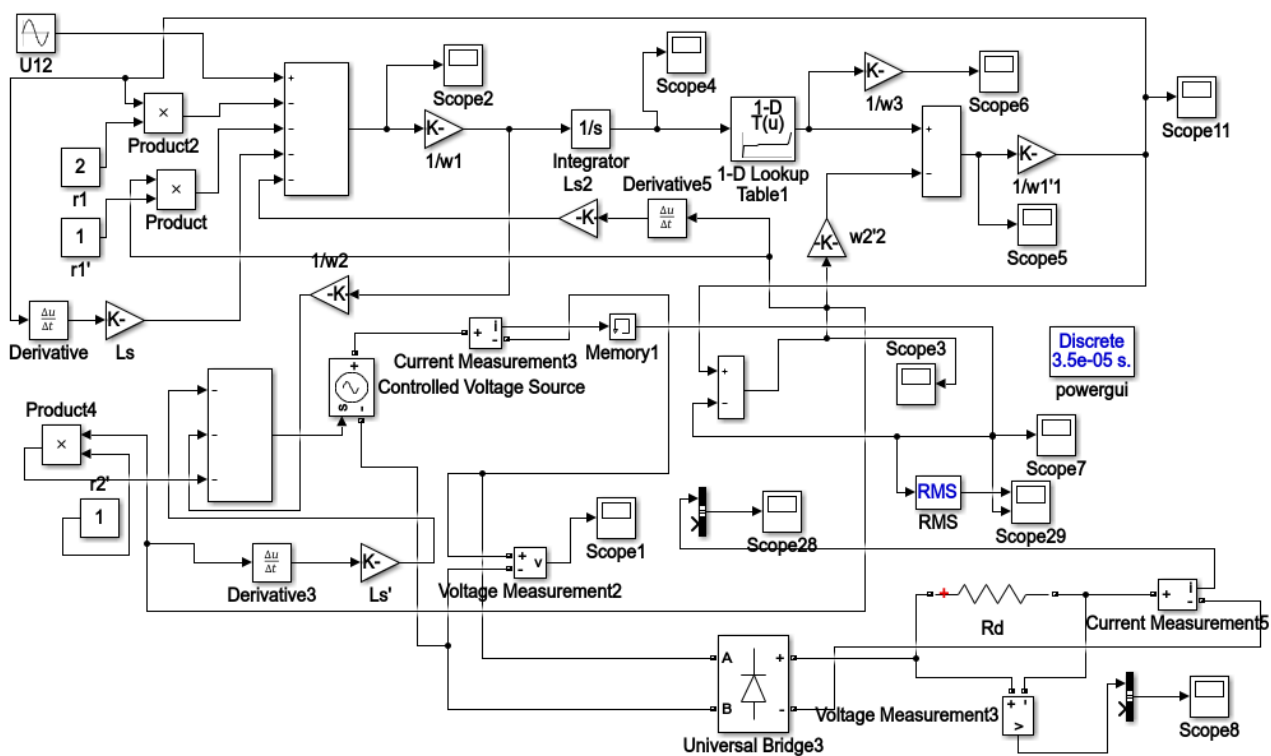


Рис. 1. Модель выпрямительного автотрансформатора

На рис. 2 показан результат моделирования в виде осциллограммы магнитного потока при работе на активную нагрузку с сопротивлением $R_d = 50$ Ом при учете параметров обмоток автотрансформатора.

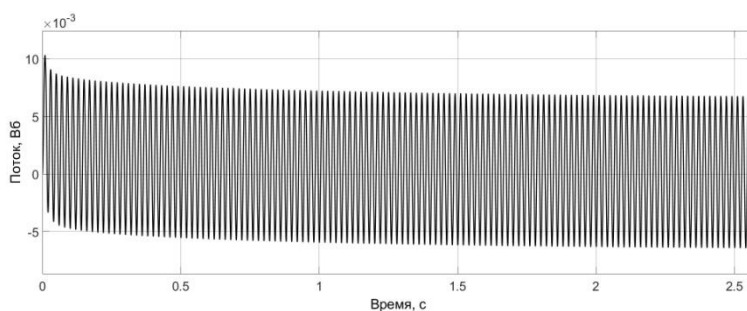
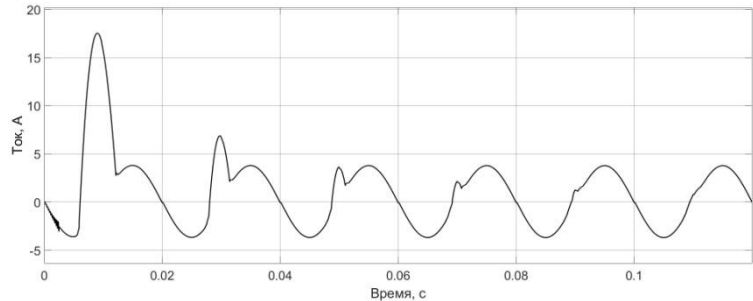


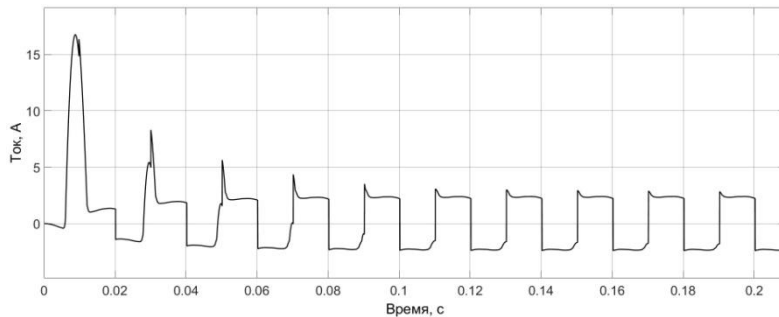
Рис. 2. Осциллограмма магнитного потока

Как видно, при включении автотрансформатора наблюдается почти двукратный бросок магнитного потока. На рис. 3, а приведена осциллограмма по-

требляемого тока при включении. На рис. 3, б показана осциллограмма тока автотрансформатора при работе на активно - индуктивную нагрузку $R_d = 50$ Ом, $L_d = 200$ мГн. Как видно, из-за насыщения магнитопровода бросок потребляемого тока составляет значение, превышающее номинальное в семь раз.



а)



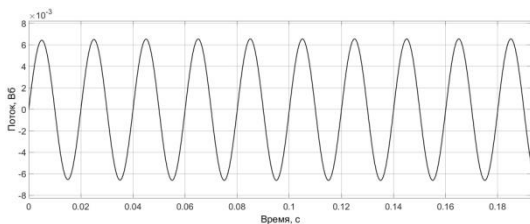
б)

Рис. 3. Осциллограммы тока:

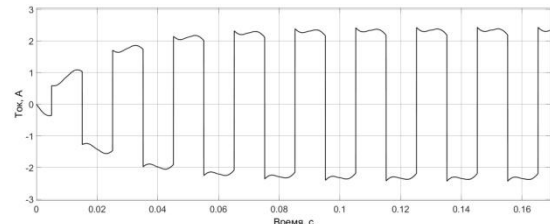
а – при активной нагрузке; б – при активно-индуктивной нагрузке

Переходной процесс в автотрансформаторах, как и в трансформаторах, зависит от фазы напряжения в момент включения. Предыдущие осциллограммы были сняты при включении в момент угла 0° . При включении в момент 90° (1,57 радиан) переходной процесс, связанный с броском тока и потока, не наблюдается. Из-за активно-индуктивной нагрузки нарастание тока происходит постепенно (рис. 4).

На рис. 5 приведены осциллограммы процесса включения автотрансформатора при уменьшении сопротивлений обмоток в 20 раз.



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы при включении при фазе напряжения 90° :

а – магнитный поток; б – потребляемый ток

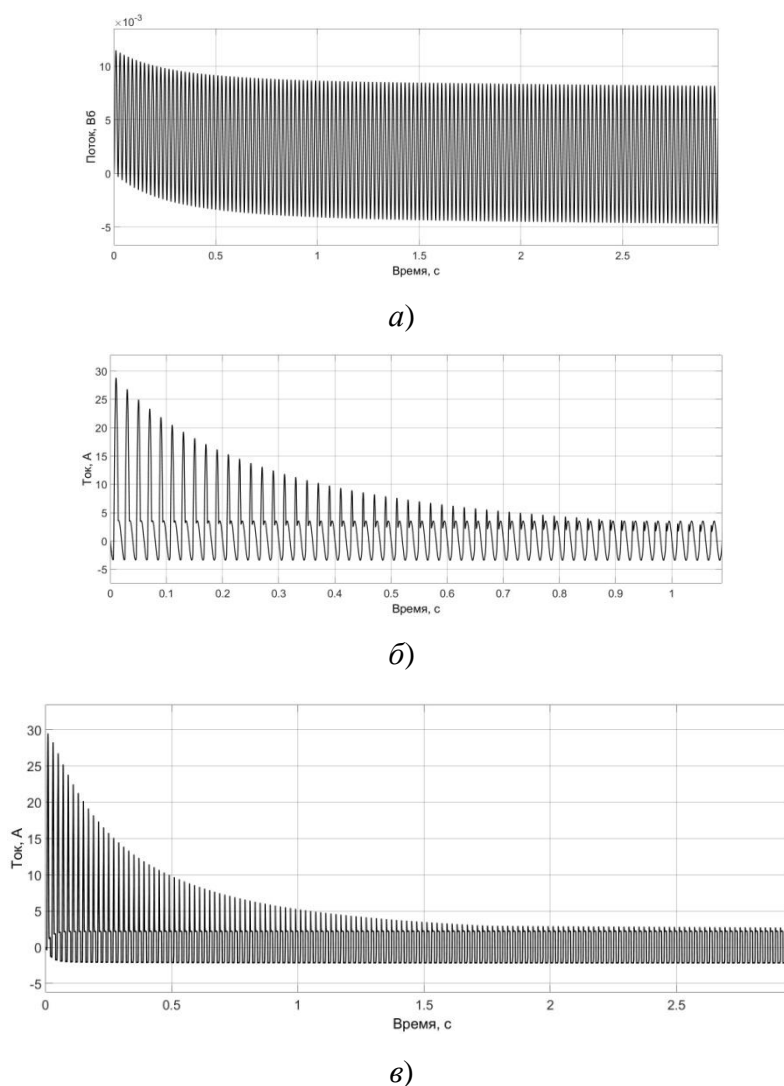


Рис. 5. Осциллограммы при сопротивлениях обмоток, уменьшенных при моделировании:

а – магнитный поток; *б* – потребляемый ток при активной нагрузке; *в* – потребляемый ток при активно-индуктивной нагрузке

Как видно, переходной процесс в этом случае протекает намного дольше, броски токов и потока больше по амплитуде. При дальнейшем уменьшении сопротивлений обмоток процессы изменяются аналогично. Таким образом, при исследовании электромагнитных процессов для достаточно точного определения показателей при включении автотрансформаторов необходимо учитывать реальную характеристику намагничивания магнитопровода, параметры элементов автотрансформатора и нагрузки, так как они во многом определяют длительность процессов и амплитуды бросков тока и магнитного потока.

Библиографический список

1. **Кацман, М. М.** Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – М.: Академия, – 2013. – 496 с.
2. **Рогинская, Л. Э.** Моделирование динамических и установившихся режимов в авто-трансформаторах при помощи программного комплекса Matlab / Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов // Достижения естественных и технических наук в XXI веке: сб. науч. тр. Междунар. научно-практич. конф. 29 сентября 2017 г. – Белгород: АПНИ, 2017. – С. 197–200.

УДК 621.3

Л.В. Белова, А.Н. Кузменков, В.Г. Титов, А.В. Шахов**ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ОБМОТОК
ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена система управления для электромагнитных подшипников мощных вращающихся агрегатов. В разомкнутом состоянии система является неустойчивой и обладает особенностями, которые необходимо учитывать при синтезе регуляторов. Рассмотрены вопросы построения импульсной системы управления и различные варианты построения внутреннего контура тока. Для расчета параметров регуляторов использовались метод передаточных функций и метод z-преобразования. Показано, что наиболее рациональным является построение контура тока ЭМП с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме. В результате моделирования импульсной системы управления электромагнитным подшипником получены переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействиям.

Control system of radial electromagnetic bearing for powerful rotating machines is proposed. In the open state the system is unstable and has the features, which must be considered while synthesizing the regulator. Issues of creating a pulse system and different variants of constructing the inner current circuit are considered. To calculate the parameters of regulators used the method of transfer functions and z-transformation method. It is shown that the best performance in speed and overshoot has a relay regulator operating in sliding mode. In the result of simulating a pulsed electromagnetic bearing control system, transient processes on control and disturbance impacts are obtained.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, контур тока, релейный регулятор, импульсная система управления, метод z-преобразования.

Key words: electromagnetic bearing, pulse control system, current loop, relay controller, z-transformation method.

Активные магнитные подшипники (АМП) являются перспективными видами опор, которые в последнее время находят все большее применение в высокоскоростных машинах и агрегатах с большой массой ротора (свыше 1 т). По сравнению с другими типами бесконтактных опор они обладают высокой грузоподъемностью (около 80 Н/см^2).

По принципу действия АМП представляют собой электромеханическую систему управления, обеспечивающую центрирование вращающегося ротора машины относительно неподвижных электромагнитов, установленных в корпусе. Подвес ротора в подобных системах обеспечивается за счёт взаимодействия между управляемыми электромагнитами статора и ферромагнитными сердеч-

никами ротора. Стабилизация заданного положения ротора достигается за счёт регулирования токов в обмотках электромагнитов по сигналам датчиков положения ротора. Обычно выделяют четыре активные зоны, которые располагаются по окружности подшипника под углом 90° относительно друг друга. Причем каждая из этих зон представляет собой самостоятельный электромагнит. При горизонтальном расположении ротора машины, когда вес ротора значительно превышает действующие возмущения, оси полюсов подшипника располагают под углом 45° относительно вертикальной оси y , что позволяет распределить весовую нагрузку между электромагнитами (рис.1) [1].

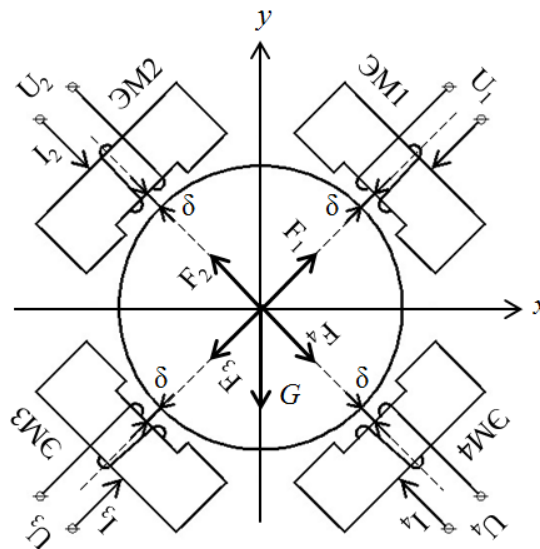


Рис. 1. Расчетная схема активного магнитного подшипника (АМП):

ЭМ1–ЭМ4 – электромагниты; U_1 – U_4 – напряжения, подаваемые на катушки электромагнитов, В; I_1 – I_4 – токи, наводимые в обмотках электромагнитов, А; F_1 – F_4 – магнитные силы, создаваемые электромагнитами, Н; G – вес ротора нагнетателя, Н; δ – регламентируемый зазор между ЭМП и цапфой вала нагнетателя, м

Из схемы рис. 1 следует, что электромагнитный подшипник как радиальный, так и осевой представляет собой неустойчивый объектом управления. Электромагниты выполняют роль исполнительных органов (ИО) системы стабилизации ротора в центральном положении. В системе, состоящей из диаметрально противоположных электромагнитов, по каждой из осей управления осуществляется одновременное изменение тока в обмотках на величину I относительно тока смещения. Как показано на рис. 2, каждый из электромагнитов (ЭМ1) и (ЭМ2), действующих на ротор по одной из осей подшипника, создает при токе одинаковые и разнонаправленные усилия F_1 и F_2 .

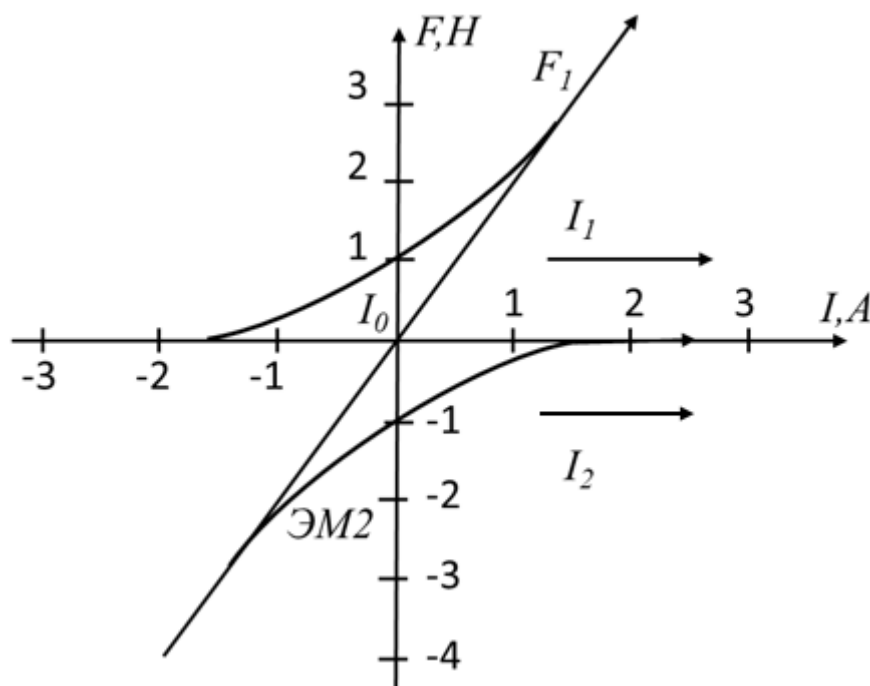


Рис. 2. Диаграмма тяговых усилий электромагнитов при дифференциальном управлении токами обмоток электромагнитного подшипника

Магнитные силы $F_1 - F_4$, создаваемые электромагнитами, обеспечивают компенсацию веса ротора G и равнодействующую других внешних сил F_B, H . Равновесие сил, соответствующее центральному положению ротора, в котором уравниваются сила тяжести ротора и тяговое усилие электромагнита, является неустойчивым. Малейшее изменение положения ротора, напряжения питания или тока в обмотке электромагнита приводит либо к падению ротора, либо к прилипанию его к электромагниту. Неустойчивость объекта вызвана, прежде всего, наличием положительной обратной связи по перемещению и большой постоянной времени электромагнита, которая зависит от величины зазора между статором и ротором ЭМП, а значит, меняется периодически. Электромагнитные процессы, протекающие в исполнительных органах, определяют выбор и структуры, и параметров системы АМП в целом.

Таким образом, из рис. 1 и рис. 2 следует, что для системы управления ЭМП наиболее предпочтительной является дифференциальная схема управления за счет линейности тяговой характеристики и её максимальной жесткости при центральном положении ротора. Здесь посредством широтно - импульсной модуляции (ШИМ) оба электромагнита из пары ЭМ1–ЭМ3 и ЭМ2–ЭМ4 управляются одним ШИМ - модулятором, первый магнит от прямого выхода, а противоположный – от инверсного. При таком управлении сумма токов в противоположных катушках, расположенных на одной оси, остается постоянной, т.е. увеличение одного тока приводит к пропорциональному снижению тока в противоположной катушке [3]. Иллюстрация этого способа управления, основанная на широтно-импульсной модуляции тока, показана на рис. 2. Кроме того, в

этой схеме вдвое сокращается число силовых вентилялей по сравнению с независимым управлением токами всех четырех обмоток. Здесь в качестве коммутирующих элементов применены IGBT транзисторы (VT1 - VT4), работающие в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой 1-2 кГц.

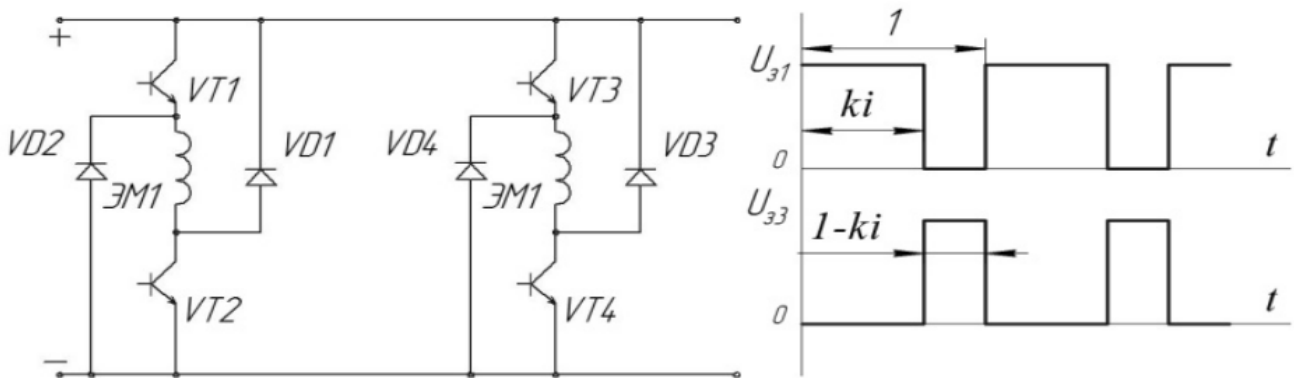


Рис. 3. Схема питания и диаграмма задающих импульсов при дифференциальном управлении токами обмоток электромагнитного подшипника

Основными техническими характеристиками магнитных подшипников являются массогабаритные и энергетические показатели, однако необходимо учитывать некоторые особенности при определении его быстродействия. Быстродействие электромагнита в создании тягового усилия оценивается по величине постоянной времени нарастания тока в обмотке. Структурный синтез системы и выбор параметров регуляторов обеспечивают как устойчивость, так и требуемые статические и динамические характеристики электромагнитного подшипника. Для повышения быстродействия электромагнитных подшипников, что очень актуально для высокоскоростных машин, применяют принципы построения и методы синтеза систем подчиненного регулирования. Настройка системы производится путем последовательной оптимизации контуров регулирования. Динамические свойства электромагнита характеризуют постоянной времени $T_\mu = \frac{L}{R}$, где L – индуктивность обмотки, Гн; R – активное сопротивление обмотки электромагнита, Ом. Также для повышения быстродействия ИО используют форсировку с отрицательной обратной связью по току в обмотке электромагнита. При форсировке обмотка электромагнита подключается к источнику питания напряжением U и в ней возникает ток I , который без обратной связи по току может достигать установившегося значения $I_y = \frac{U}{I}$, А.

Обратная связь по току ограничивает величину тока I на уровне номинального значения I_n , соответствующего заданной входной величине ИО. На переходной функции (рис. 4) жирной линией отражено изменение тока в обмотке электромагнита до I_n .

Синтезируемая по такому принципу система управления характеризуется простотой технической реализации (как средствами аналоговой, так и микропроцессорной техники) и простотой ограничения регулируемых координат (ток, скорость и т.д.) [4, 5]. Практическое преимущество многоконтурных сис-

тем управления заключается в том, что настройка контуров регулирования осуществляется независимо и последовательно.

При рассмотренном расположении электромагнитов (рис. 1 и рис. 2) и дифференциальном управлении токами электромагнитов можно рассматривать каждую ось подшипника как магнитный подвес двустороннего действия, преобразующий электрическую энергию сети питания в работу магнитных сил, обеспечивающих заданное положение ротора [1]. Контур регулирования тока в общем случае может быть представлен рис. 4. В соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3, внутренний контур образуется регулятором тока, силовым преобразователем, объектом регулирования и обратной связью по току через датчик тока.

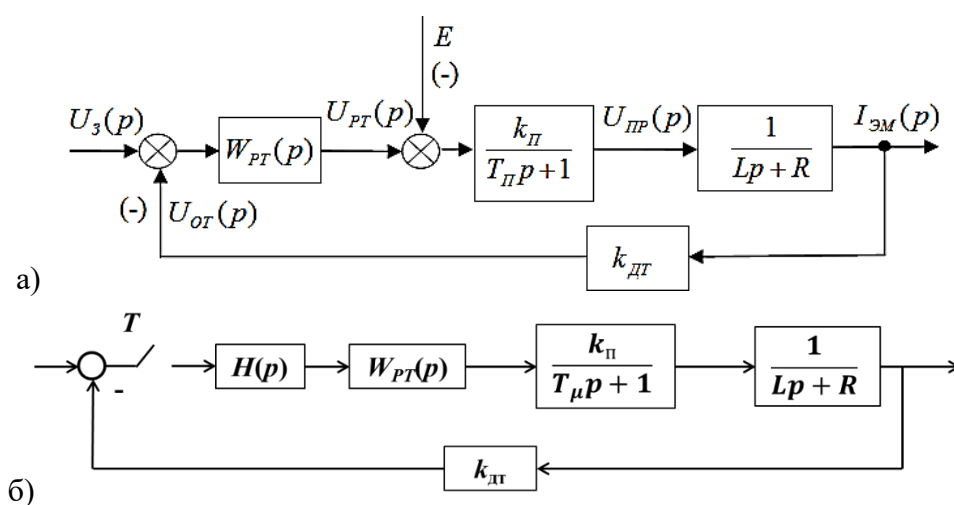


Рис. 4. Структурная схема контура тока ЭМП:

а - структурная схема внутреннего контура тока;

б - импульсная модель внутреннего контура тока

При расчете регулятора тока контур тока настраивается на модульный оптимум, при этом пренебрегают влиянием ЭДС движения E , B , и положительной обратной связью по перемещению [3]. Таким образом, в качестве регулятора тока в системе подчиненного регулирования электромагнитного подвеса ротора должен быть использован пропорционально-интегральный регулятор. Настройки регулятора будут определяться следующими параметрами:

$$W_{PT}(p) = \frac{[Lp + R]}{2k_{П}k_{ДТ}T_{\mu}p} , \quad (1)$$

где T_{μ} – малая постоянная времени во внутреннем контуре тока, с; $k_{П}$ – коэффициент передачи силового преобразователя; $k_{ДТ}$ – коэффициент передачи датчика тока; L – индуктивность электромагнита, Гн; R – активное сопротивление электромагнита, Ом.

Современные системы управления электромагнитными подшипниками являются цифровыми, центральным вычислительным ядром в подобных системах служит мощный программируемый контроллер. А принимая во внимание, что регулирование тока в электромагнитном подшипнике обеспечивается широтно-импульсным регулятором, представляет особый интерес рассмотреть объект управления как импульсный. Импульсная система управления (рис. 3, б) может быть представлена в виде последовательного соединения импульсного элемента и непрерывной части. Импульсный элемент можно представить, как последовательное соединение идеального элемента T и формирующего элемента (фиксирующей цепи) с передаточной функцией $H(p)$ [4].

Для получения дискретных моделей, как правило, используют математический аппарат z -преобразований. Импульсная передаточная функция замкнутого контура тока

$$W_{\text{зкт}}(z) = \frac{z \left\{ \frac{k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{п}} \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}{p(T_{\mu} \cdot p + 1)(L \cdot p + R)} \right\}}{1 + z \left\{ \frac{k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{п}} \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}{p(T_{\mu} \cdot p + 1)(L \cdot p + R)} \right\}} . \quad (2)$$

Формула (2) получена для самой простой непрерывной модели (рис. 3, б), когда предполагается, что регулятор системы управления может регулировать непосредственно токи электромагнитов. Дискретные передаточные функции позволяют исследовать устойчивость цифровой системы управления электромагнитным подшипником, корректно определить период дискретизации и на этапе проектирования определить достижимые жесткостные свойства магнитной опоры. Существует также способ параметрического синтеза регуляторов цифровой системы управления электромагнитным подшипником с использованием моделирования в программной среде Matlab Simulink. При этом в расчетной модели объект представляют непрерывным и подключают к нему цифровой регулятор и экстраполятор. Параметры дискретной передаточной функции регулятора определяют методом подбора.

На рис. 5 представлены расчетные значения изменения тока электромагнита газового нагнетателя мощностью 16 мВт, полученные при моделировании обозначенных вариантов построения контура тока. Представляет интерес рассмотреть несколько вариантов построения внутреннего контура тока [5]:

- контур тока с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором (рис. 5, кривые 1, 2);
- контур тока с релейным регулятором (рис. 5, кривая 3);
- контур тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме (рис. 5, кривая 4).

Для оценки адекватности полученных дискретных передаточных функций построены по ним переходные процессы и проведено их сравнение с аналогичными процессами, рассчитанными для непрерывного объекта (рис. 5). Ре-

зультаты моделирования позволяют сделать вывод, что полученные дискретные передаточные функции позволяют с достаточной степенью точности описывать процесс перемещения ротора при цифровой технической реализации системы управления осевым электромагнитным подшипником. Анализ кривых 1 и 2 рис. 5 показывает, что переходные процессы практически совпадают, а максимальная погрешность на интервале времени, равном 100 тактам периода дискретизации, составляет около 1%.

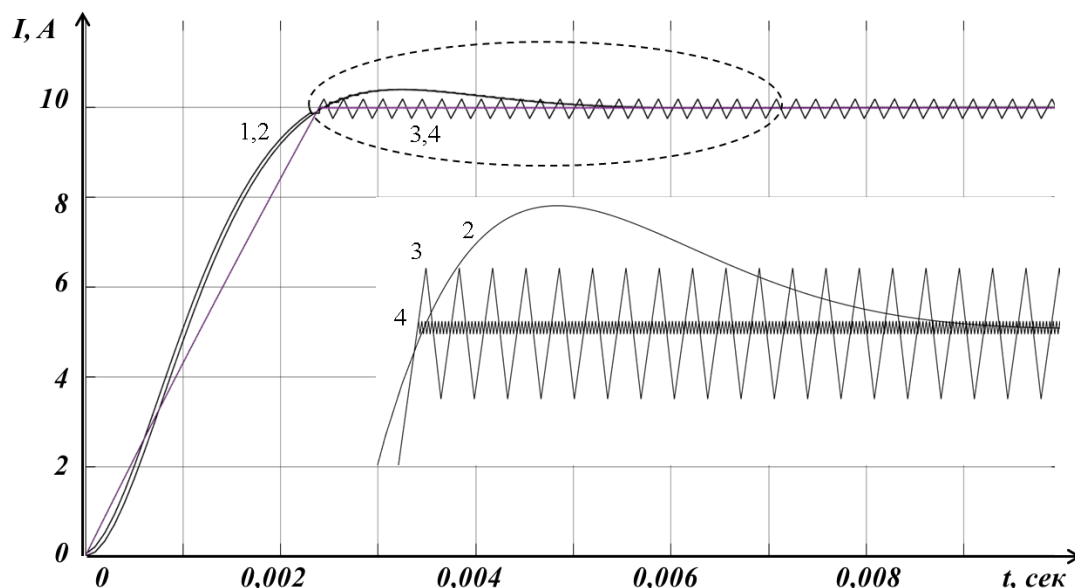


Рис. 5. Кривые переходных процессов тока при различных типах регуляторов тока:

1, 2 - контур тока с пропорционально-интегральным регулятором;

3 - контур тока с релейным регулятором;

4 - контур тока с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме.

С ПИ регулятором (рис. 5, кривая 2) контур тока является астатическим как по заданию, так и по возмущению. Перерегулирование при оптимизации на модульный оптимум составляет 4.3%. Релейный регулятор (рис. 5, кривая 3) обеспечивает более высокое быстродействие, но процесс изменения тока имеет достаточно ярко выраженный колебательный характер. При этом характер переходного процесса определяется максимальным напряжением источника питания, шириной петли гистерезиса регулятора и постоянной времени T_{II} . Чтобы повысить качество регулирования, т.е. снизить амплитуду и поднять частоту автоколебаний, необходимо ввести корректирующую цепь. Используя данный способ, можно получить в системе как медленно затухающие апериодические процессы (скользящие), так и оптимальные переходные процессы. Скользящий режим реализуется в релейных системах введением внутренней обратной связи с коэффициентом усиления k , охватывающей релейный элемент.

Проведен анализ влияния коэффициента k в обратной связи релейного регулятора на характер переходных процессов в контуре тока (рис. 6). Действие внутренней связи приводит к тому, что как только управляющий сигнал проходит через пороговое значение, релейный элемент через внутреннюю обратную связь изменяет его так, что этот сигнал проходит через пороговое значение в обратном направлении. Релейные регуляторы, работающие в скользящем режиме, принято называть вибрационными регуляторами. Анализ результатов моделирования показывает, что практически оптимальным является выбор коэффициента в обратной связи $k = 0,0000001$ (рис. 6, кривая 3). При такой настройке регулятора процесс нарастания тока имеет практически аperiodический характер (рис. 5, кривая 4).

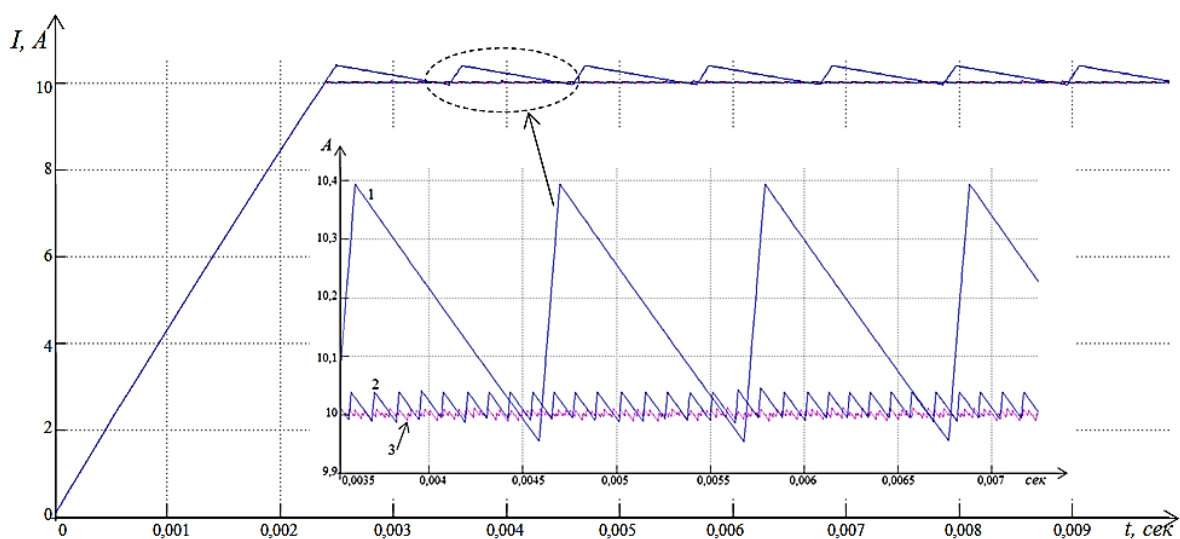


Рис. 6. Кривые переходных процессов тока при различных коэффициентах гибкой обратной связи релейного регулятора:
 1 - $k = 0,00001$; 2 - $k = 0,000001$; 3 - $k = 0,0000001$

На практике всегда реализуется режим, близкий к скользящему, вводится ограничение конечной частоты переключения релейного элемента. Реальный релейный элемент не может переключаться с бесконечной частотой вне зависимости от способа его реализации: аппаратной (реле), электронной (электронная схема) или программной (микропроцессорное устройство). Из полученных результатов видно, что наилучшими показателями по быстродействию изменения тока электромагнитного подвеса обладает релейный регулятор тока. При этом тока выполняется с гибкой обратной связью по току, что делает процесс нарастания тока практически аperiodическим.

Отметим универсальность математической модели электромагнита, которая позволяет проводить анализ статических и динамических режимов с учетом влияния перемещений ротора и различных видов управления электромагнитом.

Специфика этих процессов обусловлена одновременным воздействием входного сигнала, содержащего постоянную и переменную составляющие напряжения. Постоянная составляющая необходима для компенсации действия силы веса ротора, а переменная - возмущений, действующих на ротор.

Библиографический список

1. **Сарычев, А. П.** Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками / А. П. Сарычев, И. Г. Руковицын // Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2008. – Т. 107. – С. 11–15.
2. **Кузменков, А.Н.** Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником / А.Н. Кузменков, В.Г. Титов, А.А. Шахов // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – №4. [электронный ресурс]
URL: http://vestnik.astu.org/Content/UserImages/file/inform_2015_4/02.pdf.
3. **Макаричев, Ю.А.** Синтез системы подчиненного регулирования электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, И.С. Ткаченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2007. – №1(14). – С.143-148.
4. Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника / А.Е. Наумец [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №5(102), – С. 298-303.
5. **Журавлев, Ю.Н.** Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев [и др.]. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
6. **Макаричев, Ю.А.** Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, И.С. Ткаченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2007. – №2 (15). – С.186-188.
7. **Титов, В.Г.** Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником / В.Г. Титов, А.Н. Кузменков, А.В. Шахов // Инженерный вестник Дона, – 2015. – №3 [Электронный ресурс]
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3115.
8. **Абдурагимов, А.С.** Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА // Потребители производители компрессоров и компрессорного оборудования: труды 15-го Междунар. симпозиума. - СПб., 2010. – 128 с.

УДК 62-52:656.56

А.С. Хлынин¹, В.Г. Титов²**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА
НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ**АО «Гипрогазцентр»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приведены теоретические разработки алгоритма для инвариантной системы управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами, учитывающего изменения основных технологических параметров транспорта газа и внешних влияющих воздействий. Алгоритм основан на линейном регрессионном анализе параметров, влияющих на технологию компримирования газа.

In article provided theoretical developments of algorithm for gas compressor unit electric drive invariant control system, which consider all the variance of gas transport technological parameters and also external influences. The algorithm is based on linear regression analysis of all parameters which influence on gas compression process.

Ключевые слова: электропривод, газоперекачивающий агрегат, система управления.

Key words: electric drive, gas compressor unit, control system.

Модель множественной линейной регрессии

Частотно - регулируемый электропривод уже давно широко используется во многих областях промышленности и многократно доказал свою технико-экономическую целесообразность. В настоящее время высоковольтные преобразователи частоты начинают применяться и в транспорте газа. Современные электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) используют частотное регулирование двигателя для повышения надежности и эффективности работы при его пусках и изменениях режимов [1, 3, 4, 5].

Расширение распространения ЭГПА с частотно-регулируемым приводом (ЧРП) требует создания систем автоматического регулирования (САР) скорости вращения электропривода, учитывающих все технологические и внешние факторы, влияющие на режимы работы газоперекачивающего агрегата.

Процесс компримирования газа в ЭГПА зависит от множества параметров: технологических, конструктивных, климатических и т.д. Учесть все эти параметры аналитическими выражениями практически невозможно. Для построения алгоритма управления предложено уравнение множественной линейной регрессии. Регрессионный алгоритм строится на основе статистической

информации о режимах работы ЭГПА и изменении всех действующих параметров.

Для обработки экспериментальных данных использована модель линейной регрессии в матричном виде

$$y = \alpha + x\beta, \quad (1)$$

где y – матрица выходных параметров системы (величины скорости вращения ЭГПА или технологических параметров); x – матрица входных воздействий (параметров задания и внешних возмущающих воздействий); β – параметры механизма преобразований в системе; α – матрица помех (неучтенных факторов).

На рис. 1 приведена общая функциональная схема взаимодействия переменных реального объекта.



Рис. 1. Общая схема взаимодействия при статистическом исследовании

Выходные переменные $y^{(n)}$ характеризуют результат функционирования объекта и представляют собой зависимые результирующие отклики. Неучтенные остаточные компоненты $\zeta^{(m)}$ представляют собой случайные латентные факторы, отражающие влияние второстепенных воздействий и случайных ошибок измерения.

Анализ данных по КС «Парабель»

Реальное регрессионное уравнение составляется на основании ретроспективных данных по конкретному газоперекачивающему агрегату. Для расчетов были использованы статистические данные работы ЭГПА КС «Парабель» мощностью 4 МВт. Количество срезов данных - 100. Данные являются абсолютно репрезентативными, приведены для широкого диапазона изменения всех параметров в течение календарного года.

Отбор факторов, вошедших в уравнение множественной линейной регрессии, осуществлялся по следующим принципам: должны быть количественно

измеримы; не должны быть коррелированы между собой; не должны ухудшать общих параметров регрессии.

Корреляционный анализ факторов проводился на основе оценки коэффициентов частной корреляции. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты частной корреляции

Параметры	Q_H	$P_{ВХ}$	$P_{ВЫХ}$	$T_{ВХ}$	$T_{ВЫХ}$
Давление на входе ЭГПА $P_{ВХ}$, кгс/см ²	-0,017				
Давление на выходе ЭГПА $P_{ВЫХ}$, кгс/см ²	0,026	0,695			
Температура газа на входе ЭГПА $T_{ВХ}$, °С	0,193	-0,007	0,287		
Температура газа на выходе ЭГПА $T_{ВЫХ}$, °С	0,223	-0,118	0,450	0,899	
Температура наружного воздуха T_H , °С	0,198	-0,249	-0,069	0,535	0,480

Так как факторы температур на входе и выходе ЭГПА являются сильно коррелированными (коэффициент корреляции $> 0,7$), необходимо исключить один из факторов из регрессионного уравнения. Исключим фактор $T_{ВХ}$ - регрессионное уравнение с его участием дает чуть худшие показатели.

Несмотря на то, что ряд других факторов также имеют значимую корреляцию, они не исключаются, потому что их исключение приводит к существенному ухудшению точности регрессионного уравнения.

Таким образом, в качестве регрессионной модели работы ЭГПА принята линейная пятифакторная модель вида

$$n = \beta_1 Q + \beta_2 P_{ВХ} + \beta_3 P_{ВЫХ} + \beta_4 T_{ВЫХ} + \beta_5 T_H + \alpha, \quad (2)$$

где α – неучтенные факторы.

Одним из важнейших требований регрессионного анализа является обязательная нормальность распределения наблюдаемых случайных величин. Оценка нормальности распределения проводится по критерию Шапиро - Уилка, как одного из самых эффективных критериев [6]. Данный критерий основан на отношении оптимальной линейной несмещенной оценки дисперсии к ее обычной оценке методом максимального правдоподобия. В [7] приведена аппроксимация, позволяющая применить критерий Шапиро - Уилка без таблиц и упростить проверку.

Для значимости $\alpha = 0,05$ предлагается статистика

$$W_1 = \left(1 - \frac{0,6695}{n^{0,6518}}\right) \frac{s^2}{B}, \quad (3)$$

где s^2 – дисперсия случайной величины; n – количество опытов;

$$B = \{\sum_{j=1}^m a_j (x_{n-j} - x_j)\}^2; m = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor; \quad (4)$$

где a – исследуемый параметр; j – номер опыта;

$$a_0 = \frac{0,899}{(n - 2,4)^{0,4162}} - 0,02, \quad (5)$$

$$a_j = a_0 \left[z + \frac{1483}{(3 - z)^{10,845}} + \frac{71,61^{-10}}{(1,1 - z)^{8,26}} \right], \quad (6)$$

$$z = \frac{n - 2j + 1}{n - 0,5}. \quad (7)$$

При $W_1 < 1$ нулевая гипотеза нормальности распределения случайных величин отклоняется. Для величины скорости вращения (n) $W_1 = 1,22 > 1$, соответственно распределение признается нормальным. Для всех остальных случайных величин произведена аналогичная проверка.

Параметры β_i и α находятся в результате обработки экспериментальных данных с использованием средств MathCAD. Получено численное уравнение множественной регрессии

$$n = 10,2Q - 313,7P_{\text{вх}} + 245,6P_{\text{вых}} + 15,5T_{\text{вых}} - 1,5T_{\text{н}} + 5397,6. \quad (8)$$

Средняя ошибка аппроксимации равна 0,75%, что указывает на высокую точность построенной модели.

Для подтверждения адекватности полученного регрессионного уравнения проведено статистическое оценивание регрессии [8], включающее в себя:

- проверку гипотез о значениях коэффициентов регрессии;
- построение доверительных интервалов для коэффициентов регрессии и доверительных областей для регрессии;
- анализ статистической однородности регрессии;
- анализ независимости регрессионных остатков.

По результатам оценивания полученное регрессионное уравнение признано адекватным.

Выводы

1. Применение современных ЭГПА с частотно - регулируемым приводом позволяет существенно повысить эффективность транспорта газа. Для управления ЭГПА с ЧРП предложен алгоритм, позволяющий учесть основные технологические и внешние влияющие факторы и обеспечить оптимальность энергетических характеристик.

2. В основу предлагаемого алгоритма положена регрессионная модель взаимосвязи основных параметров работы ЭГПА. В результате обработки ретроспективных статистических данных по режимам работы агрегата и изменения основных действующих факторов составлена линейная пятифакторная регрессионная модель, позволяющая рассчитывать оптимальную скорость вращения электропривода в режиме реального времени.

3. Проведенный статистический анализ полученного регрессионного уравнения показал его адекватность и возможность использования для прогнозирования оптимальной величины скорости вращения ЭГПА при различных режимах работы с учетом всех технологических, конструктивных и климатических факторов.

Библиографический список

1. **Пужайло, А.Ф.** Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2011. – Т.3. – 560 с.
2. **Хлынин, А.С.** Моделирование работы электроприводов газоперекачивающих агрегатов / А.С. Хлынин, А.С. Белов // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014.: в 2 т. – 2014. – С. 414-420.
3. **Краснов, Д.В.** Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. – 2014. – №6 (707). – С. 86-89.
4. **Крюков, О.В.** Регулирование производительности ГПА с помощью преобразователей частоты // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – №3. – С.21-24.
5. **Крюков, О.В.** Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39-43.
6. **Кобзарь, А.И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
7. **Казакавичус, К.А.** Приближенные формулы для статистической обработки результатов механических испытаний // Завод. Лаб. – 1988. – Т. 54. – №12. – С. 82-85.
8. **Kryukov, O.V.** Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – V. 84. – Is. 3, – P. 135-140.

УДК 62-52-83:656.56

Е.В. Бычков, О.А. Мотина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫМИ АГРЕГАТАМИ ГАЗОХРАНИЛИЩ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ работы электроприводных агрегатов газохранилищ с инвариантными системами управления. Получены результаты формализации физических процессов в электрической машине в виде математических моделей. Приведены результаты компьютерного моделирования переходных процессов некоторых групп технологических агрегатов подземного хранения газа с вентиляторным моментом на валу. Предложены пути улучшения динамических показателей систем с синхронными машинами.

Annotation: The article presents an analysis of the operation of electric drive aggregates of gas storages with invariant control systems. The results of the formalization of physical processes in an electric machine in the form of mathematical models are obtained. The results of computer simulation of the transient processes of some groups of technological aggregates of surface storage of gas with a fan-type torque on the shaft are presented. Ways to improve the dynamic performance of systems with synchronous machines are proposed.

Ключевые слова: газохранилище, регулирование режима, электроприводные агрегаты, синхронные машины, моделирование, инвариантная система.

Key words: gas storage, regime regulation, electric drive units, synchronous machines, simulation, invariant system.

Наиболее рациональным и широко распространенным техническим средством резервирования природного газа является создание подземных хранилищ газа (ПХГ) в различных средах: в пористых пластах, в соляных кавернах и в искусственных или естественных горных выработках [1, 2]. Наибольшее количество ПХГ в мире (около 80%) создано в истощенных газоконденсатных и нефтяных месторождениях.

Основными функциями ПХГ являются сглаживание неравномерности потребления газа, регулирование режимов эксплуатации участков протяженных газопроводов, обеспечение надежности экспортных поставок и создание различных видов резервов газа для энергетической безопасности страны [3, 4].

В силу развития сети ПХГ, совершенствования техники и технологии их работы перед ПХГ ставятся новые актуальные задачи эксплуатации в мультициклическом режиме, покрывая не только резкие сезонные колебания газопотребления, но и изменения спроса. Другой задачей является интеллектуализация всех технологических процессов ПХГ для разработки интегральных показателей и системы ранжирования, а создание единой методики моделирования

позволит оптимизировать этот процесс и учесть все геологические, технологические и экономические факторы.

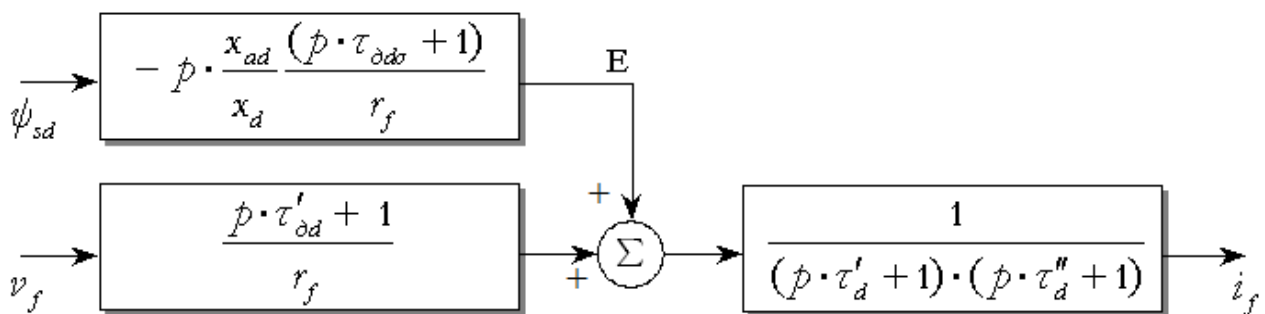
Аппаратная и энергетическая поддержка этих задач ПХГ для стабильных поставок газа потребителям, снижение энергоемкости и себестоимости напрямую связаны с модернизацией существующего оборудования: электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) [5 - 8] и автономных генераторных комплексов (АГК) систем электроснабжения (СЭС) [9, 10]. Основной машиной, используемой для привода компрессоров КС и в АГК, в частности, в ветроэнергетических установках (ВЭУ), является синхронный двигатель (СД) и генератор (СГ), благодаря известным преимуществам. Возможности расширения функциональных возможностей СД и СГ, улучшения их характеристик связаны с внедрением новых методов управления и апробацией их путем моделирования для различных режимов работы газотранспортных объектов.

Особенности работы синхронных двигателей ЭГПА

Работа практически всех существующих ЭГПА на КС ПХГ (рис. 1, а) происходит в нерегулируемых машиной режимах транспорта природного газа.



а)



б)

Рис. 1. Общий вид СТД-12500-2 ЭГПА (а) и модель контура тока возбуждения СД (б)

Возможности изменения давления на выходе КС ограничены методами дискретного включения/отключения отдельных агрегатов и дросселированием (перепуском газа) на стороне нагнетания. Поэтому главными проблемами эксплуатируемых ЭГПА являются безопасный пуск и устойчивость работы при возмущениях со стороны питающей сети и нагрузки. При реконструкции электроприводных КС ПХГ возникает вопрос о целесообразности применения регулируемых систем на базе высоковольтных преобразователей частоты (ПЧ). Это обусловлено требованиями энергосбережения и точной стабилизации давления на выходе при неравномерном графике подачи.

Микропроцессорная система управления позволяет технически реализовать векторное регулирование по цепи статора и по цепи возбуждения (рис. 1, б) с идентификацией угла нагрузки, а также интегрировать САУ в АСУ КС. Регулирование тока возбуждения СД дает возможность формировать оптимальные процессы и снижать ударные моменты (гидравлические удары). При этом устойчивость СД обеспечивается векторной САУ. Таким образом, выбор оптимальной структуры ЭГПА определяется путем технико-экономического анализа, а функциональные возможности новых систем СД необходимо оценить путем моделирования.

Синхронные электрогенераторы систем электроснабжения

Неудовлетворительное состояние традиционных СЭС ПХГ приводит к снижению надежности газотранспортных систем. Многие электросети не способны обеспечить требуемую категорию надежности объектов ПАО «Газпром», а резервирование от энергосистемы затруднено строительством ЛЭП большой протяженности. Источники на основе ВЭУ не обеспечивают стабильно электроэнергией, так как их ветровой поток зависит от природных факторов, носящих стохастический характер. Однако надежность и эффективность использования их обеспечивается с помощью гибридных СЭС. Для выбора структуры комплекса и синтеза алгоритмов САУ целесообразно использовать программные средства, определяющие параметры генерирующих, накапливающих и преобразующих узлов. Специализированное ПО реализуется на базе гибридного логического аппарата, состоящего из традиционного и нейро - нечеткого элементов. Нечеткая логика является эффективной в электромеханических системах с неполным математическим описанием и способствует улучшению процессов регулирования «в большом». Оценку эффективности работы СГ (как центрального элемента такой СЭС) целесообразно проводить также с помощью компьютерного моделирования.

Компьютерная модель СГ

В качестве примера приведем пакет MATLAB с приложением визуального моделирования Simulink с библиотекой SimPowerSystems. В этих программных продуктах не нужно полное математическое и логическое описание

каждого компонента структуры, что облегчает и ускоряет процесс однократного синтеза блоков. Рассмотрим модель базовой структуры автономной ВЭУ, которая аналогична модели синхронного ЭГПА.

Базовая структура условно делится на блоки ветрогенератора (СГ), выпрямителя, преобразователя; блоки отбора мощности, аккумуляторных батарей, инвертора, нагрузки переменного тока и альтернативной нагрузки постоянного тока. На основе математического и логического описания каждого блока системы строится его имитационная модель, интегрируемая в единую систему базовой структуры.

Для имитационной модели базовой структуры можно выделить два канала потока переменных: прямой канал напряжения, обратный канал тока. Данная модель позволяет проводить виртуальные эксперименты, получать динамические и статические характеристики процессов базовой структуры при изменении воздействий. В качестве примера рассмотрим систему стабилизации напряжения СГ при изменении скорости СГ или электрической статической нагрузки. Гибридный регулятор выполняет стабилизацию напряжения СГ воздействием на обмотку возбуждения. Прототипом является система стабилизации напряжения СГ с регулятором амплитудно-фазового компаундирования (АФК) на базе традиционной логики.

Синтез гибридного регулятора решается итерационно в несколько этапов: описание объекта управления и составление алгоритма работы фаззирегулятора; структура и описание гибридного регулятора на базе нечеткой логики; алгоритм работы нечеткого регулятора; оценка возможных диапазонов изменения входных и выходных физических переменных, выбор количества нечетких множеств; составление свода правил; выбор формы и параметров функции принадлежности и моделирование гибридного регулятора.

Анализ переходных процессов

Приведем результаты моделирования систем стабилизации амплитуды выходного напряжения СГ с регулятором АФК (рис. 2, *а*) и гибридным нечетким регулятором (рис. 2, *б*). Синхронный генератор STAMFORD-MX321 ($U = 380$ В, $P = 81.5$ кВт, $\cos\varphi = 0.8$, $f = 50$ Гц), активно-индуктивная нагрузка $\cos\varphi = 0.9$, $k = 1$ - кратность номинальной нагрузки.

Анализ полученных данных показывает, что использование гибридного регулятора улучшает динамические процессы в инвариантных системах.

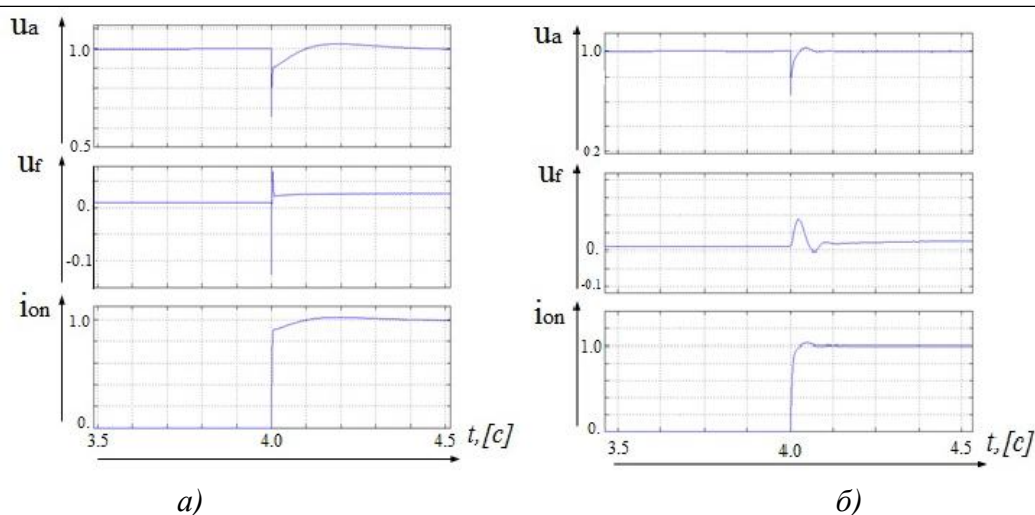


Рис. 2. Процессы в СГ с САР АФК (а) и с нечеткой САР (б)

Таким образом, методика блочного моделирования систем позволяет:

- анализировать работу систем на базе синхронных машин любой сложности, составленных из заранее смоделированных блоков - компонентов;
- упрощает выбор оптимальной структуры и параметров СЭС и ЭГПА, исходя из факторов энергетической эффективности;
- упрощает синтез нейро-нечетких алгоритмов САУ СГ и приводов ПХГ.

Библиографический список

1. **Мілов, В.Р.** Intellectual management decision support in gasindustry / V.R. Milov, B.A. Suslov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095-1101.
2. **Пужайло, А.Ф.** Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло [и др.]. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.
3. **Бабичев, С.А.** Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24-31.
4. **Степанов, С.Е.** Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – №2. – С. 5-10.
5. **Аникин, Д.А.** Проектирование систем управления ЭГПА / Д.А. Аникин, И.И. Рубцова, Н.В. Киянов // Газовая промышленность. – 2009. – №2. – С. 44-47.
6. **Крюков, О.В.** Регулирование производительности ГПА с помощью преобразователей частоты // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – №3. – С.21-24.
7. **Степанов, С.Е.** Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций / С.Е. Степанов, А.С. Плехов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29-31.
8. **Крюков, О.В.** Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39-43.
9. **Серебряков, А.В.** Интеллектуальные ветроэнергетические установки для автономных систем электроснабжения / А.В. Серебряков. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 135 с.
10. **Васенин, А.Б.** Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки / А.Б. Васенин, А.В. Серебряков // Приводная техника. – 2012. – №4. – С. 2-11.

УДК 621.314

И.В. Багрецов¹, И.Е. Бердников², А.О. Кечкин², А.П. Слuzов², А.В. Шахов²**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ ИНВЕРТОР
НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

АО «Нижегородский масложировой комбинат»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Статья посвящена разработке интеллектуального инвертора напряжения. Рассмотрены разработанные авторами схемотехнические решения и особенности топологии печатной схемы.

The article is devoted to the development of intelligent power inverter. Considered technological solutions applied by the authors.

Ключевые слова: интеллектуальный транзисторный инвертор, токовый сенсор, драйвер транзистора, драйверный модуль.

Keywords: intelligent power inverter, current sensor, gate driver, driver module.

Наиболее сложным и ответственным звеном систем автоматизированного электропривода является силовой преобразователь, надежная (безотказная) работа которого является гарантией работоспособности всей системы. Инверторы напряжения для высоковольтных двигателей переменного тока строятся на IGBT или МОП-транзисторах, управление которыми осуществляется специализированными узлами – драйверами. Для защиты от сверхтоков, превышающих допустимые для транзисторов значения, к примеру, драйвер HSPCL 316J имеет специальную защиту, снимающую управляющие импульсы с затворов, если напряжение на транзисторе превышает 7 В.

Инверторы напряжения для низковольтных двигателей переменного тока (напряжение питания ниже 50 В) строятся только на МОП-транзисторах с малым сопротивлением открытого канала (порядка 1 мОм). При максимальном токе у таких транзисторов падение напряжения не превышает 200 мВ, что затрудняет применение драйверов HSPCL 316J для защиты. Следовательно, требуются другие схемотехнические решения и тщательно выверенная топология печатной платы и конструкции всего силового модуля в целом. Вопросу разработки интеллектуального низковольтного инвертора напряжения посвящена данная статья.

Рассмотренный инвертор напряжения используется в качестве преобразователя энергии в системе электропривода рулевой рейки на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами. Инвертор автономный, трехфазный, полностью управляемый, построен на основе современных МОП-транзисторов

фирмы International Rectifier. Напряжением питания для него служит бортовая сеть автомобиля. Выходное напряжение регулируется при помощи широтно-импульсной модуляции на несущей частоте 20 кГц.

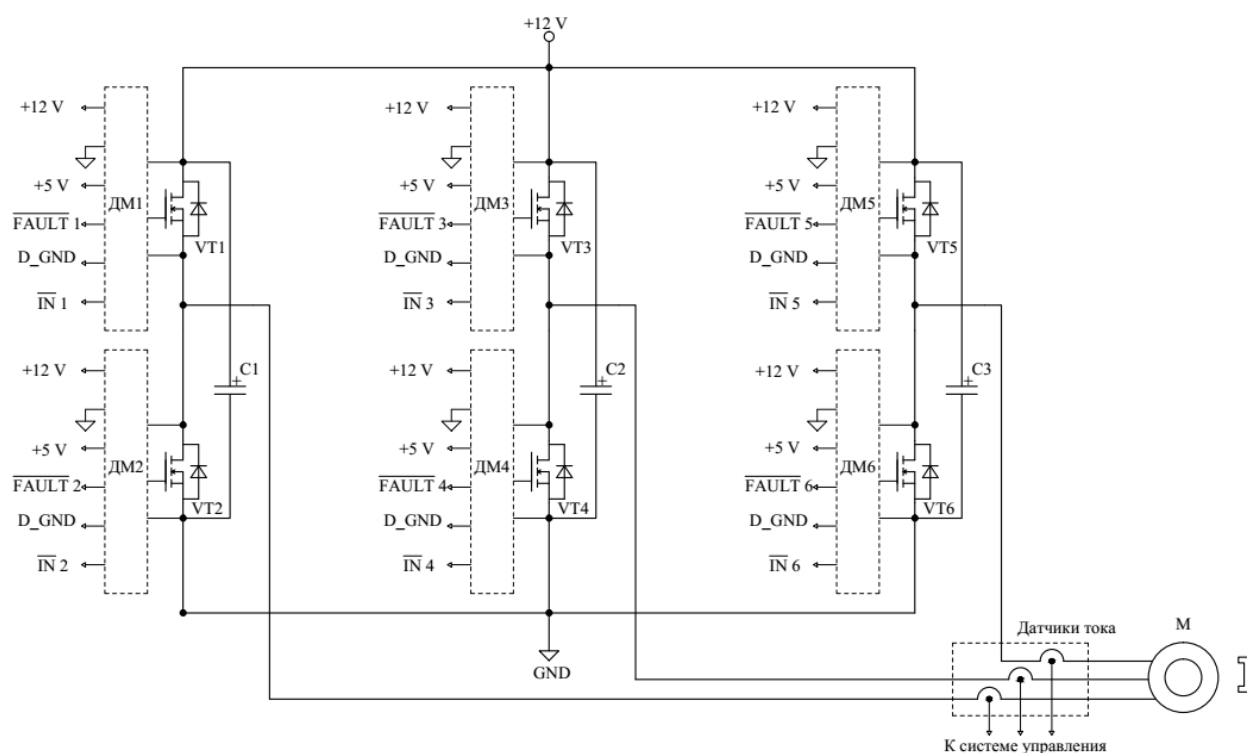


Рис. 1. Принципиальная схема транзисторного инвертора напряжения

Для контроля тока, протекающего через фазы двигателя, применяются датчики тока фирмы Allegro ACS758LCB-100B-PFF-T. Данные датчики имеют однополярное питание, но формируют сигнал в смещенном коде, что позволяет измерять ток в обоих направлениях. Датчики построены на элементах Холла, что обеспечивает гальваническую развязку между силовой цепью и цепью управления.

Для управления отдельно каждым транзистором был разработан драйверный модуль, его схема представлена на рис. 2. Модуль предназначен для формирования импульсов управления силовыми транзисторами инвертора. В качестве драйвера управления затвором используется специализированная микросхема фирмы ON Semiconductor модели MC33153.

Главным достоинством драйвера является встроенная защита транзистора от превышения тока. Для работы этой защиты предполагается использование драйвера вместе с токоизмерительным резистором либо токоизмерительной микросхемой. Защита имеет два уровня срабатывания:

- 1) при превышении уровня 65 мВ на токоизмерительном входе снимается импульс управления с транзистора;

2) при превышении уровня 130 мВ снимается импульс управления с транзистора и появляется сигнал ошибки, который передается в систему управления.

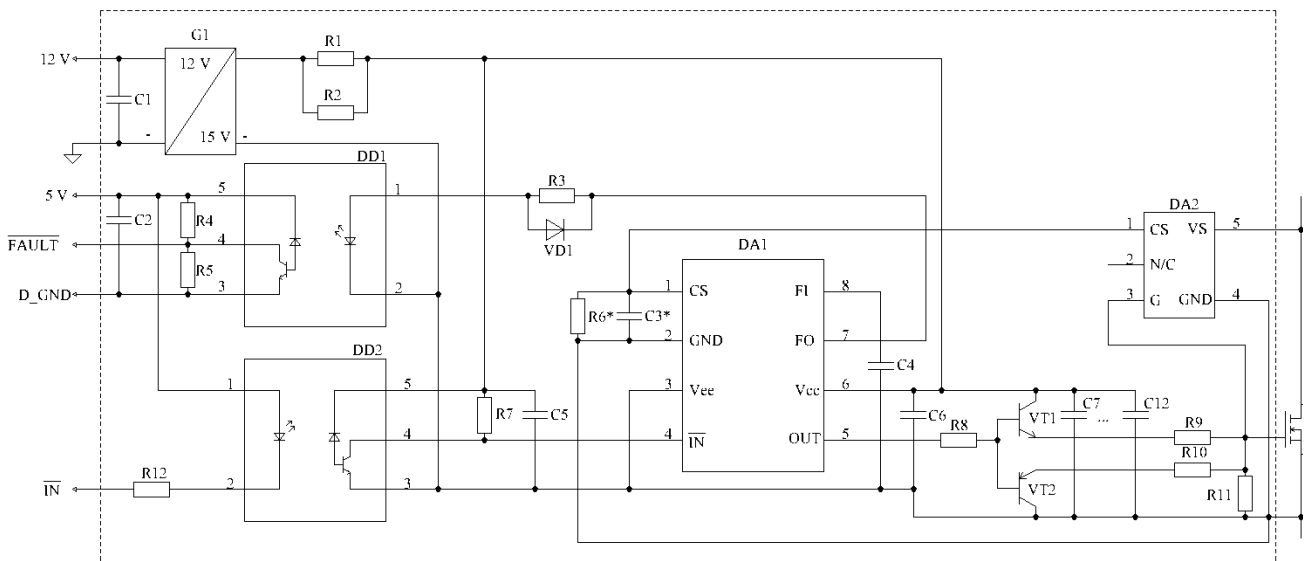


Рис. 2. Принципиальная схема драйверного модуля

Так как применяемые транзисторы не имеют токового выхода, то для получения информации о перегрузке используется специализированная микросхема IR25750LP. Она подключается параллельно силовому транзистору и измеряет падение напряжения на канале силового транзистора при его включении. Токовый сенсор работает только в те моменты, когда открыт транзистор. Управление микросхемой происходит тем же импульсом, что и на затвор. Для уменьшения пульсаций измеряемого напряжения и предотвращения ложных срабатываний защиты установлен конденсатор С3. Параллельно ему установлен резистор R6, с помощью которого производится настройка уровня срабатывания защиты.

Благодаря применению токового сенсора и специализированного драйвера обеспечивается аппаратная защита транзистора от превышения тока, что делает модуль интеллектуальным.

Для более быстрого включения-выключения силовых транзисторов (с целью уменьшения динамических потерь и повышения КПД преобразователя) на выходе драйвера включен дополнительный усилительный каскад, построенный на комплементарной паре биполярных транзисторов.

Гальваническую развязку драйверного модуля от системы управления обеспечивают быстродействующие оптронные пары. Первый оптрон служит для информирования о перегрузке на транзисторе, а второй передает управляющие импульсы на драйвер транзистора. Питание выходной цепи драйвера осуществляется от DC/DC преобразователя Murata NDY1215C с малой проход-

ной паразитной емкостью, благодаря чему практически исключается перекрестное влияние силовых цепей транзисторов друг на друга.

В настоящий момент интеллектуальный транзисторный инвертор работает в системе электропривода опытного образца электроусилителя руля. В процессе наладки и настройки электропривода не было ни одного случая выхода из строя силовых транзисторов, что доказывает надежность разработанного интеллектуального инвертора.

Библиографический список

1. **Колпаков, А.** Характеристики и особенности применения драйверов MOSFET и IGBT // Компоненты и технологии. – 2003. – №3.
2. MC33153 Single IGBT Gate Driver - Onsemi [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC33153-D.PDF>.
3. IR25750LPBF - Infineon Technologies [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.infineon.com/dgdl/ir25750lpbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355ca1d0e16f7>

УДК 621.311

А.Н. Егоров¹, В.О. Парфенов², А.С. Семёнов³**ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПУЛЬПОНАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ В УСЛОВИЯХ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК**СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО)¹,
ООО «ВеирМинералз РФЗ»²,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова³

Исследуется система электропривода главной пульпонасосной установки обогатительной фабрики путем математического моделирования в среде MatLab. Использована известная методика построения математической модели, позволяющая получить параметры установившегося режима работы насосного агрегата при стабилизации уровня жидкости в зумпфе. Модель доработана - введен узел, учитывающий поведение системы при скорости электропривода ниже граничной скорости насоса. Это позволило дополнительно получить графики переходного процесса контролируемых физических величин насоса. Показана энергоэффективность при использовании частотно-регулируемого электропривода на пульпонасосной установке.

The article deals with the electric drive system of the main pumping station of the concentrating mill by means of mathematical modeling in MatLab environment. The authors took a well-known method of building a mathematical model, which allows to obtain the parameters of the steady-state operation of the pumping unit in the stabilization of the liquid level in zumpfe, but the model has been modified, namely, introduced a unit that takes into account the behavior of the system at the speed of the electric drive below the pump boundary speed. This allowed additionally to the graphs of the transition process controlled by physical values of the pump. As a result, energy efficiency is shown when using a frequency-controlled electric drive on a pulp pump unit.

Ключевые слова: электрический привод, насос, обогатительная фабрика, энергосбережение, энергоэффективность, математическое моделирование, модель, MatLab.

Key words: electric drive, pump, concentrating mill, energy saving, energy efficiency, mathematical modeling, model, MatLab.

Оборотное водоснабжение фабрик по обогащению алмазосодержащей руды, будучи затратным вспомогательным процессом, требует тщательного изучения с точки зрения повышения эффективности узлов и элементов, входящих в его систему. Средний расход воды на одну тонну обогащаемой алмазосодержащей горной массы составляет 11 - 13 м³. Эксплуатационные расходы на водно-шламовое хозяйство находятся в пределах 34 - 48% от общих расходов обогатительных фабрик.

Решение задачи по снижению затрат на оборотное водоснабжение заключается в комплексном подходе, который должен рассматривать различные ас-

пекты обеспечения водно-шламового хозяйства, начиная от проектирования и заканчивая рекультивацией нарушенных земель.

Немаловажным фактором на пути снижения затрат на содержание водно-шламового хозяйства является обеспечение энергосбережения, так как обеспечение водооборота на обогатительных фабриках - процесс энергоемкий. Так, установленная мощность одновременно работающих насосов на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» (ПАО) варьируется от 3 до 7 МВт, а годовое энергопотребление превышает 30 млн кВт·ч (на примере обогатительной фабрики №3 Мирнинского ГОКа). Отсюда актуальность исследований в области повышения энергетической эффективности насосного хозяйства оборотного водоснабжения обогатительных фабрик.

В данной статье рассматривается эффективность применения частотно-регулируемого электропривода на главных пульпонасосных установках обогатительной фабрики.

Таблица 1

Паспортные данные главной пульпонасосной установки

Параметр	Значение
Тип насоса	<i>Warman® 20/18 АНР</i>
Частота вращения	500 мин ⁻¹
Номинальная подача	2800 м ³ /с
Номинальный напор	90 м
КПД	0,67
Тип двигателя	<i>Teco АЕСК WM001</i>
Номинальная мощность	1600 кВт
Номинальная частота вращения	495 мин ⁻¹
Номинальное скольжение	0,01
Номинальное напряжение	6000 В
Номинальный ток	197
Коэффициент мощности	0,82
КПД	95,6%
Тип преобразователя	<i>ACS5000</i>
Номинальное напряжение	6000 В
Номинальный ток	240
Полная мощность	2500 кВА

В табл. 1 представлены исходные данные исследуемой системы электропривода главной пульпонасосной установки обогатительной фабрики №3 Мирнинского ГОКа. Система состоит из насоса Warman 20/18 АНР, оснащенного частотно-регулируемым электроприводом, построенным на базе высоковольтного преобразователя частоты типа ACS5000 с асинхронным электродвигателем типа Teco АЕСК WM001.

Каждый из элементов системы по-своему уникален и заслуживает отдельного рассмотрения. Так, в шламовых насосах, выпускаемых под брендом Warman, собраны технические решения, которые разрабатывались, апробировались и совершенствовались еще с 1938 г. несколькими поколениями инженеров компании WeirMinerals - одного из мировых лидеров в области разработки и производства технологического оборудования для горнодобывающей отрасли. Очевидно, что насосы Warman претерпели множество изменений и благодаря внедренным инновациям сегодня это одни из самых надежных насосов (значительный срок службы узлов и элементов). Также следует отметить, что часть инноваций направлена на сокращение времени обслуживания за счет внедрения конструктивных особенностей, позволяющих упростить процессы замены узлов и деталей насоса. Более детальная информация по насосам Warman представлена в [1 - 3].

Преобразователь частоты ACS5000 серийно выпускается корпорацией АВВ и является уникальным продуктом на рынке высоковольтных преобразователей частоты, так как сочетает в себе ряд инновационных технических решений.

Для проведения исследований была рассчитана и построена математическая модель в среде MatLab/Simulink [4 - 5] (рис. 1) реальной действующей насосной установки. Для построения модели насосного агрегата была взята за основу методика, представленная в [6], позволяющая получить в результате моделирования параметры установившегося режима работы насосного агрегата при стабилизации уровня жидкости в зумпфе.

С целью получения характеристик динамического режима модель была доработана - внесен узел, учитывающий поведение системы при скорости электропривода ниже граничной скорости насоса. Это позволило дополнительно получить графики переходного процесса контролируемых физических величин насоса.

Также модель была дополнена узлом, позволяющим задавать зависимость изменения водопритока от времени, что может быть использовано, например, для имитации изменения притока жидкости в зумпф за период от запуска технологической линии и до ее выхода на номинальные параметры. Так, на рис. 2 представлены графики изменения скорости, момента и мощности насоса, полученные в результате моделирования. На графиках видно, что скорость, момент и мощность изменяются в зависимости от притока жидкости в зумпф.

На рис. 3 показаны зависимости водопритока, подачи, напора и стабилизируемого уровня насоса от времени, полученные в результате моделирования. На графиках видно, что при изменении водопритока система автоматически на-

рацивает подачу насоса и тем самым стабилизируется уровень жидкости в зумпфе на отметке 3,5 м.

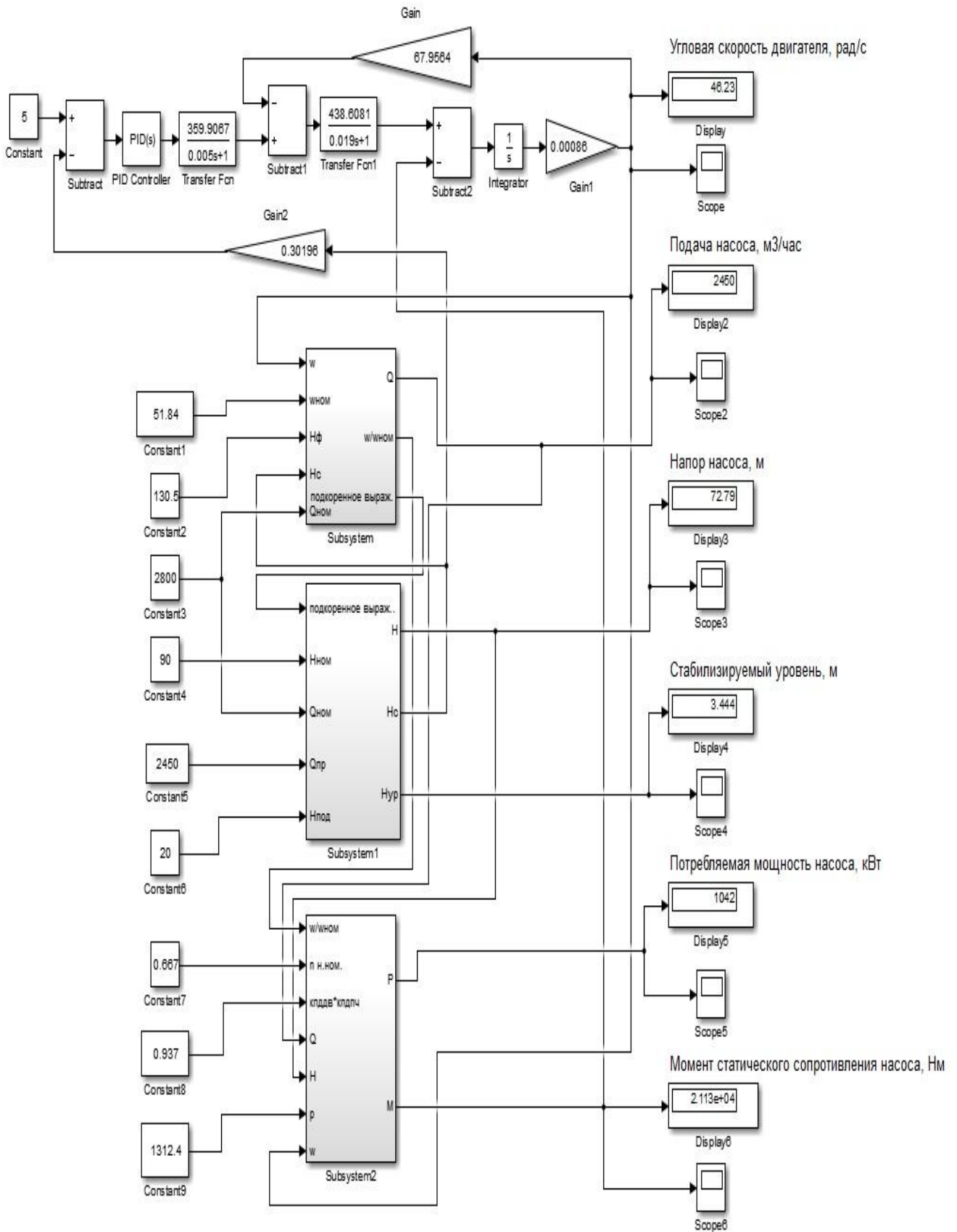


Рис. 1. Модель пульпонасосной установки в среде MatLab/Simulink

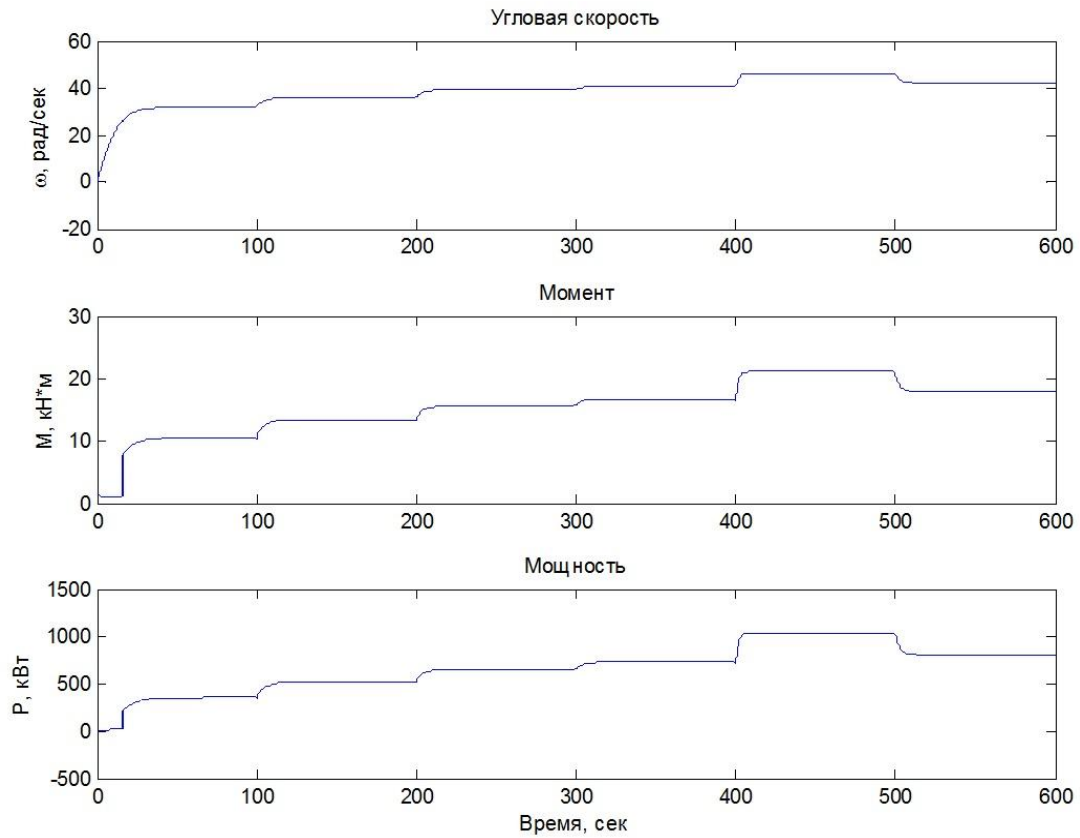


Рис. 2. Графики изменения скорости, момента и мощности

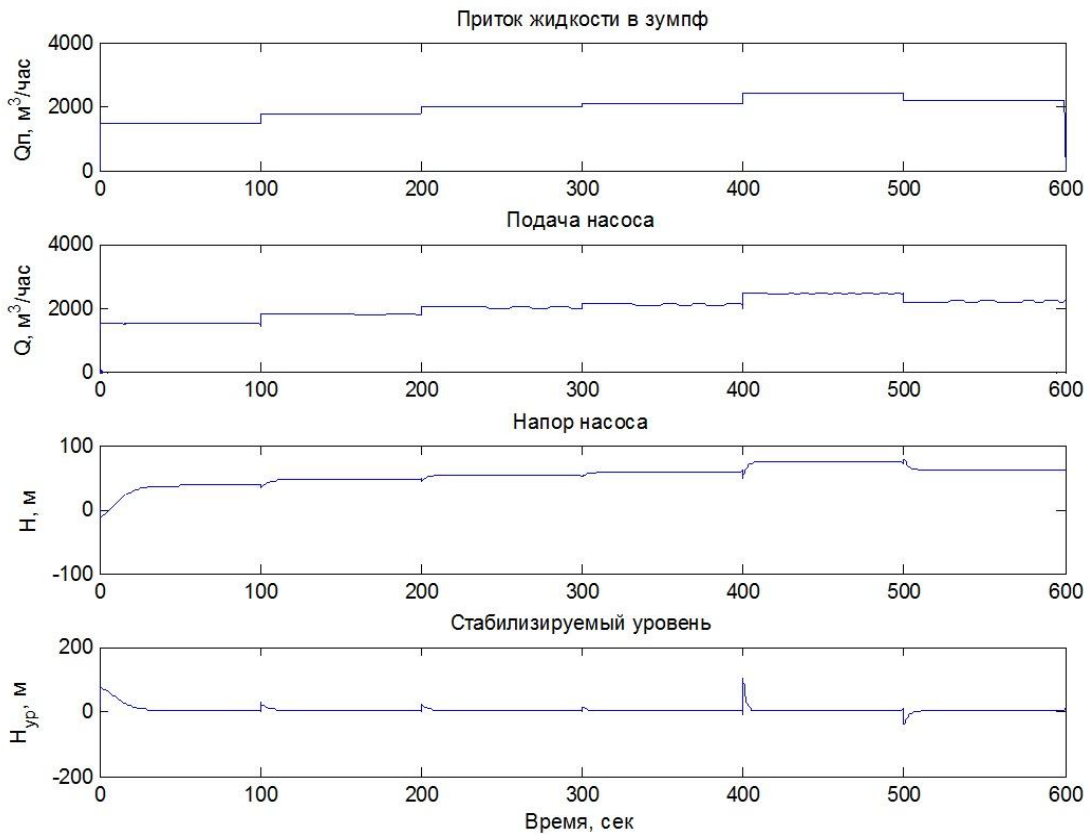


Рис. 3. Графики изменения притока, подачи, напора и стабилизируемого уровня

Задавая значения притока жидкости в зумпф, согласно суточному или месячному графику притока жидкости, можно получить график потребления электроэнергии и сопоставить его с другими системами стабилизации уровня жидкости в зумпфе. В рассматриваемом случае водоприток колеблется от 1500 до 2500 м³/ч, а средний приток жидкости составляет 2000 м³/ч при времени работы насоса 8050 ч/г. Средняя мощность, потребляемая насосным агрегатом, составляет 828 кВт. Годовое потребление электроэнергии 7254 тыс. кВт·ч/г., что на 42 % меньше в сравнении с вариантом стабилизации уровня жидкости дросселированием с помощью задвижек. Удельное потребление энергии при использовании регулируемого электропривода составляет 0,41 кВт·ч/м³, а при дросселировании 0,51 кВт·ч/м³.

В заключение следует отметить, что рассмотрено снижение затрат только лишь за счет снижения энергоемкости процесса перекачивания пульпы. Вместе с тем, применение частотно - регулируемого электропривода приводит к значительному снижению эксплуатационных затрат. Достигается это в основном за счет увеличения срока службы узлов и элементов системы в результате обеспечения плавности работы насосного агрегата в динамических режимах. Однако внедрение и применение высоковольтного частотно-регулируемого электропривода приводит к значительному увеличению капитальных затрат, а также накладывает определенные дополнительные требования к условиям эксплуатации и обслуживанию системы электропривода, и только безусловное соблюдение этих условий обеспечит возврат инвестиций в виде снижения совокупных затрат [7 - 9].

Библиографический список

1. В России открыт сборочный цех насосных агрегатов WARMAN® // Горная промышленность. – 2016. – № 5 (129). – С. 96.
2. Компания WEIR MINERALS представляет новую модель насоса WARMAN® // Уголь. – 2011. – № 11 (1028). – С. 38.
3. ООО «ВЕИР МИНЕРАЛЗ РФЗ» компания WEIR MINERALS открыла локальное сборочное производство насосных агрегатов WARMAN® // Уголь. – 2016. – № 10. – С. 68-69.
4. Семёнов, А.С. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А.С. Семёнов, И.А. Якушев, А.Н. Егоров // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – №8. – С. 56-64.
5. Семёнов, А.С. Моделирование автоматизированного электропривода: метод. указ. / А.С. Семёнов. – М.: Спутник, 2012. – 60 с.
6. Фащиленко, В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие / В.Н. Фащиленко. – М.: Горная книга, 2011. – 260 с.
7. Егоров, А.Н. Практический опыт применения преобразователей частоты PowerFlex 7000 в горнодобывающей промышленности / А.Н.Егоров, А.С. Семенов, О.В. Федоров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4 (119). – С. 86-93.
8. Совершенствование систем управления энергетической эффективностью и экономической безопасностью промышленных предприятий / Н.В. Грунтович [и др.] // Вестник Чувашского ун-та. – 2015. – № 3. – С. 40-48.

9. Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей / А.Е. Козярук [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №6. – С. 30-35.

Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, Д.В. Зырин, А.С. Демидова, О.А. Пронина

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОНТУРНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания интеллектуальных распределительных сетей. Описаны преимущества устройств FACTS в существующих электрических сетях. Рассмотрены возможные области применения твердотельного регулятора напряжения для управления потоками мощности. В программном продукте PSCAD создана имитационная модель многоконтурной распределительной сети с устройствами ТРН.

The paper deals with development of intelligent distribution networks. Advantages are described of FACTS devices in existing electric networks. Possible applications of the solid-state voltage regulator for controlling power flows are considered. In the software product PSCAD, an imitation model of a multi-circuit distribution network with TRN devices was created.

Ключевые слова: распределённая генерация, PSCAD, гексагональные сети, распределительные сети, твердотельный регулятор напряжения.

Key words: distributed generation, PSCAD, hexagonal grids, distribution networks, solid-state voltage regulator.

В настоящее время достаточно активно происходит внедрение распределенной генерации в системы электроснабжения, которое сопровождается созданием активных цифровых устройств регулирования, автоматических систем управления режимами сетей, унификацией конструктивно-топологических решений.

В связи с этим актуальной задачей является создание интегрированной, саморегулируемой, распределенной системы электроснабжения на основе разработки интеллектуальных систем передачи и распределения электроэнергии, обеспечивающей автоматическое управление электросетями.

Важным вопросом при функционировании электрической сети выступает неравномерность загрузки источников питания при их параллельной работе. Силовые полупроводниковые элементы являются ключевыми компонентами в устройствах на основе технологий гибких электрических сетей Flexible

Alternating Current Transmission Systems (FACTS). Поток электрической энергии через данные системы может быть полностью контролируемым. В распределительных сетях стоит задача комплексного регулирования потоков мощности, в связи с чем интерес вызывают технологии UPFC и IPFC.

К таким устройствам относится твердотельный регулятор напряжения (ТРН) для распределительных сетей 6 – 20 кВ, разрабатываемый профессорским составом института электроэнергетики НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Недостатки централизованного электроснабжения от крупных источников (низкое качество электроснабжения потребителей, высокая частота аварийных отключений, высокая степень износа электрогенерирующего и сетевого оборудования, удаленность от децентрализованных потребителей, большие объемы выбросов загрязняющих веществ и тепловых сбросов от крупных источников) и повышение требований к энергетической безопасности как регионов в целом, так и отдельных локальных узлов могут рассматриваться как факторы распространения децентрализованной энергетики и распределенной генерации и определяют тенденцию развития данных направлений [1].

Гексагональная распределительная сеть (ГРС) отвечает требованиям активно-адаптивных сетей благодаря возможности менять свою конфигурацию в зависимости от текущего режима [2 - 5]. Причем типовые алгоритмы управления функционированием (распределением и потреблением электроэнергии) позволят создать полностью автоматическую сеть, соответствующую современным мировым стандартам и запросам потребителей.

Для исследования работы сети с ТРН была сформирована математическая и имитационная модели с двумя источниками (рис. 2).

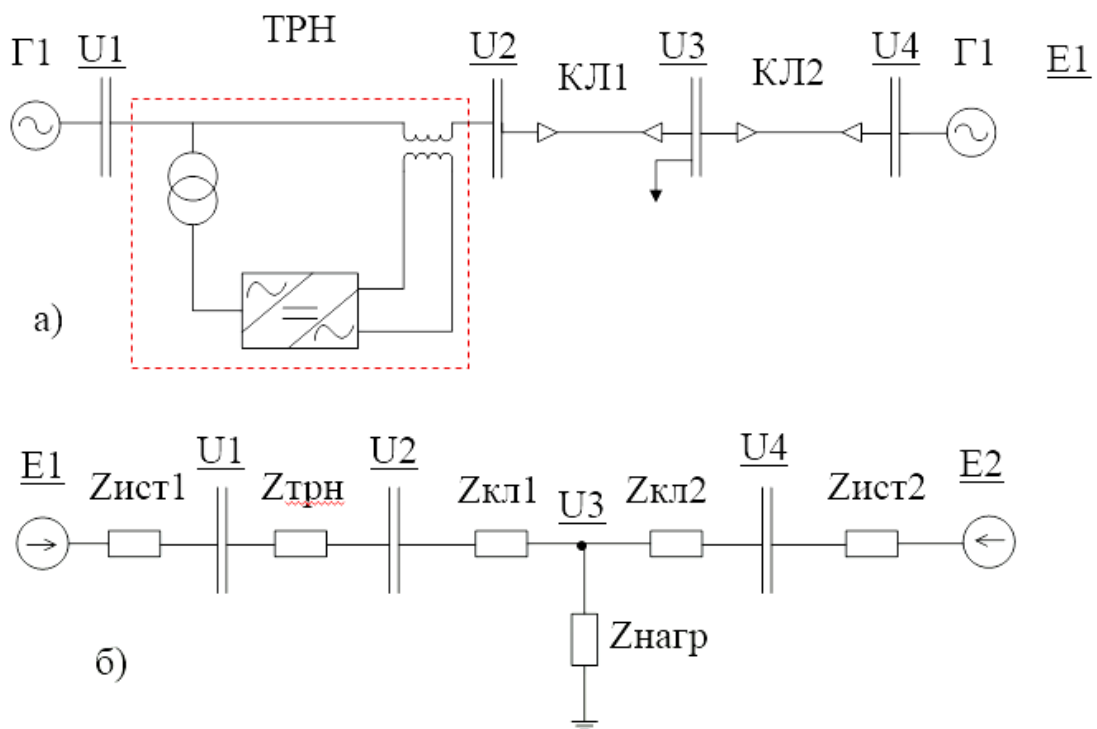


Рис. 2. Схемы электропередачи с ТРН (а) и замещения электропередачи с ТРН (б)

На моделях (рис. 2) отработаны основные принципы регулирования параметров режима. Эта модель показательна, потому что любую сеть можно привести к эквиваленту линии с двумя источниками и нагрузкой. Исследовано математически, как влияет вольтодобавка на изменение тока и напряжения в сети. В зависимости от того, где устанавливаются ТРН, меняется их зона действия. При установке ТРН непосредственно у источника Г1 происходит централизованное регулирование потока мощности всей сети. Если установить ТРН непосредственно на линии КЛ1 или КЛ2, то регулирование будет происходить только на данном участке сети, но возможно незначительное изменение напряжения на шинах параллельной ветви.

Установка самих ТРН в сеть изменяет потокораспределение при условии отсутствия регулирования. Максимальное регулирование происходит в линии, где установлен ТРН. Это связано с тем, что сеть является протяженной, а мощность ТРН значительно меньше суммарной мощности источников.

Максимальный диапазон регулирования в линии с ТРН порядка 40% от начальной мощности линии. Если говорить про линии без ТРН, то максимальный диапазон регулирования 3,5% достигается в линии, равноудаленной от источников. Минимальное регулирование будет в линиях, максимально приближенных к источникам и находящихся в одной цепи с ТРН.

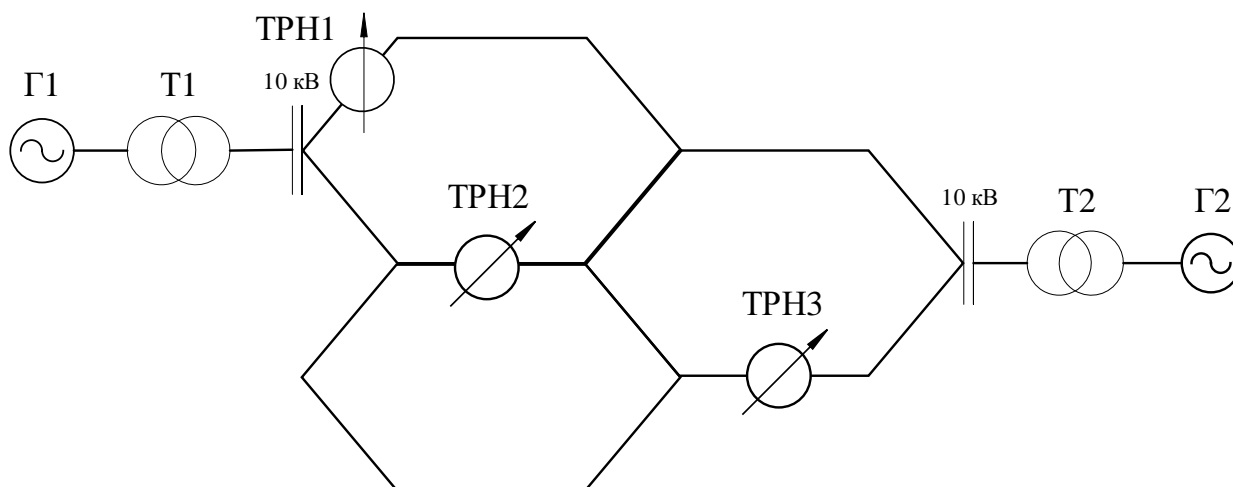


Рис. 3. Схема многоконтурной сети с ТРН

Для анализа влияния устройства ТРН в многоконтурных сетях была сформирована модель (рис. 3) из трех колец гексагонального типа и двух источников питания, соединенных между собой кабельными линиями (трансформаторы ТРДН 25 кВА 110/10, ТРДН 16кВА 110/10, КЛ 3х(АВВГ 1х300), нагрузки по 2МВА). Установка трех ТРН позволит добиться максимального перераспределения потоков мощности в отдаленных ветвях сети.

Имитационное моделирование показало эффективность применения устройств типа ТРН в сетях со сложной многоконтурной конфигурацией (возмож-

ность направления потока мощности по удаленным ветвям). Максимальное регулирование достигается на участках сети, максимально приближенных к активному ТРН, на 30 - 40%. Наименьшее изменение потоков мощности происходит на участке сети у источника на 1,5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.574.21.0167 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0167).

Библиографический список

1. **Li, Z.** Global Energy Interconnection/ Z. Li. – М. : AcademicPress, 2015. – 396 с.
2. **Лоскутов, А.Б.** Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре / А. Б. Лоскутов, А. А. Лоскутов, Д. В. Зырин / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева - 2016. - № 3 - С. 85-94.
3. Моделирование режимов работы распределительной сети с различными источниками распределенной генерации / А. Б. Лоскутов и [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики : сб. научно-технич. ст., 2017. - С.128-131.
4. The Parameter's and Configuration's Controlling of a 6-20 kV Distribution Network // А. В. Loskutov [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research, 2017. V. 12, N. 23, P. 13868-13873.
5. Современные подходы к построению систем энергоснабжения мегаполисов / А.Б.Лоскутов [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VIII междунар. научно-технич. Конф., 02 – 06 октября 2017, Самара: – В 2 т. – Иваново: Самарский гос. техн. ун., 2017. – Т 1. – С. 39 - 48.

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, Л.Е. Веселов, В.И. Федорчатенко**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВНЕДРЕНИЮ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТОТЭ В СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены методические рекомендации по внедрению энергоэффективных систем генерирования электроэнергии на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) в энергосистемы действующих предприятий на примере сельскохозяйственного предприятия (СХП) молочного животноводства. Рассмотрены особенности интеграции системы электро-снабжения с мини-ТЭЦ на ТОТЭ в различные группы существующих предприятий, учитывая особенности их деятельности и требования к надежности электро-снабжения и качеству электроэнергии.

The article presents methodological recommendations of integration the energy-efficient power generation systems based on solid oxide fuel cells (SOFC) into the existing enterprise's energy systems on the example of the agricultural enterprises of dairy farming. The features of integration power supply system with SOFC-based mini-CHP into various groups of the existing enterprises, taking into account features of their activity and requirements to reliability of power supply and electricity quality, are also considered here.

Ключевые слова: система генерирования электроэнергии, ТОТЭ, мини-ТЭЦ на ТОТЭ, система электро-снабжения, сельскохозяйственное предприятие, биогаз.

Keywords: power generation system, SOFC, SOFC-based mini-CHP, power supply system, agricultural enterprise, biogas.

Для обеспечения устойчивой работы потребителей электрической энергии в АПК необходимы надежные и бесперебойные системы электро-снабжения. Решить данную проблему можно за счет внедрения на действующих предприятиях АПК систем генерирования электроэнергии на основе ТОТЭ, использующей в качестве топлива биогаз [1].

Эффективно преобразовывать продукты сбраживания биоотходов в тепло- и электроэнергию позволяет мини - ТЭЦ на ТОТЭ, использующих прямое преобразование биогаза в электроэнергию. При этом отсутствие традиционного процесса сжигания топлива обеспечивает их высокую экологичность. Мини - ТЭЦ на ТОТЭ имеют высокий КПД (порядка 80%), низкую стоимость керамических материалов стэков и могут работать на обычном углеводородном топливе [2].

При всех преимуществах мини - ТЭЦ на ТОТЭ данные энергоустановки (ЭУ) не имеют широкого распространения. Их применение сдерживается низкой маневренностью, отсутствием решений по интеграции в энергосистемы по-

требителей, отсутствием нормативных документов по проектированию мини-ТЭЦ на ТОТЭ, работающих на биогазе, и др.

Изложенные в статье методические рекомендации разработаны с целью устранения проблемы внедрения работающей на биогазе мини - ТЭЦ на ТОТЭ в системы электроснабжения действующих предприятий АПК. Предложенные авторами методические рекомендации рассмотрены на примере электроснабжения СХП молочного животноводства и в общем случае содержат шесть этапов.

Основными элементами разработанной системы генерирования электроэнергии являются: мини - ТЭЦ на ТОТЭ; система накопления электроэнергии на основе аккумуляторных батарей (АКБ); система преобразования электроэнергии; резервный источник питания (РИП). Приведенный перечень элементов является минимально необходимым составом разработанной системы генерирования электроэнергии. Допустимо наличие отклонения от перечня (варьируются тип АКБ, источник резервного питания и т.п.). Представленное комплексное решение применимо к любому потребителю с уточняющими особенностями (в зависимости от категории бесперебойности электроснабжения).

Этап 1. Энергетическое обследование предприятия

Первый этап включает в себя расчет электрических нагрузок, определение группового суточного графика нагрузки, установление пиковой мощности предприятия (дневной максимум) и минимальной ночной нагрузки.

Расчет электрических нагрузок предприятия может быть произведен с использованием следующих традиционных и широко применяемых методов: метод упорядоченных диаграмм; метод удельных плотностей нагрузок; метод удельных расходов электроэнергии; метод коэффициента спроса и др.

Этап 2. Определение параметров исходного сырья

Второй этап включает в себя определение объемов исходного сырья (топлива), необходимого для работы мини-ТЭЦ на ТОТЭ, и параметров устройств получения первичного топлива – биометана: биогазовая установка (метантенк), газгольдеры, углекислотная разделительная камера и др.

Авторами исследовано СХП молочного животноводства, где базовым расчетным условием второго этапа является численность крупного рогатого скота. При исследовании СХП, занимающихся иными видами деятельности (деревообработка, свиноводство и т.д.), необходимо установить аналогичные параметры, определяющие итоговый суточный (годовой) объем первичного топлива (древесной стружки, паллетов; свиного навоза и т.д.), что является основой для последующего выбора мощности мини-ТЭЦ.

Расчет суточного объема биометана на СХП молочного животноводства подробно представлен авторами в статье «Выбор мощности мини-ТЭЦ на

ТОТЭ для электроснабжения сельскохозяйственных предприятий» [3] и содержит следующие шаги:

- определение суточного объема (массы) биомассы на СХП, предназначенной к сбраживанию, кг;
- определение суточного объема биомассы, включающей примеси, кг;
- определение содержания сухого вещества в биомассе, кг;
- определение количества воды, необходимого для доведения биомассы до оптимального уровня влажности, л;
- определение общей массы навоза (для расчета объема метантенка) с учетом требуемой влажности (для летнего и зимнего периода), кг;
- определение содержания сухих органических веществ в биомассе, кг;
- определение теоретического выхода биогаза при условии полного разложения субстрата после 10 - 20 дней ферментации при соответствующем температурном режиме, м³;
- определение теоретического выхода(объема) биогаза при неполном сбраживании субстрата, м³;
- определение теоретического выхода (объема) биометана, м³;
- определение объема метантенка, рассчитанного на полную загрузку, м³;
- определение количества теплоты, требуемой для подогрева ежедневно загружаемой биомассы до необходимой температуры брожения, МДж;
- определение тепловых потерь биогазовой установки, МДж;
- определение количества теплоты, требуемой для нагрева ежедневно загружаемой биомассы до необходимой температуры брожения, с учетом тепловых потерь, МДж;
- определение электрической мощности перемешивающего устройства (насоса), кВт.

Этап 3. Выбор мощности мини-ТЭЦ на ТОТЭ

На третьем этапе определяется электрическая мощность мини - ТЭЦ на ТОТЭ, на основе результатов предыдущего этапа (ключевой параметр – суточный объем первичного топлива). Данный расчет также был представлен авторами в статье [3] и имеет следующую последовательность:

- расчет теоретически возможной электрической мощности мини - ТЭЦ по удельному расходу топлива и его суточной выработке, кВт;
- выбор фактической электрической мощности мини-ТЭЦ, кВт;

- определение полезной электрической мощности мини-ТЭЦ на ТОТЭ за вычетом мощности на собственные нужды ЭУ, кВт;
- определение полезной тепловой мощности мини-ТЭЦ на ТОТЭ за вычетом мощности на собственные нужды ЭУ, МДж;
- расчет фактического суточного расхода биометана, необходимого для обеспечения непрерывной работы мини-ТЭЦ, м³;
- определение разницы между ежесуточным производством и потреблением биометана, м³;
- расчет необходимого объема запасаемого первичного топлива для обеспечения непрерывной работы мини - ТЭЦ на годовом интервале, м³;
- расчет фактического объема запасаемого первичного топлива на годовом интервале, м³;
- проверка условия по наличию необходимого годового объема первичного топлива.

Этап 4. Определение емкости системы накопления

На четвертом этапе рассчитывается система накопления электроэнергии исходя из полученной электрической мощности мини - ТЭЦ и значения пиковой нагрузки СХП (дневного максимума за зимние сутки). Данный расчет может проводиться различными традиционными методами в зависимости от параметров аккумуляторов и схемы их соединения.

Этап 5. Выбор системы преобразования

Для определения типа и количества преобразователей необходимо знать выходные параметры выбранных энергоустановок – величину и род напряжения.

Структура системы преобразования определяется конкретно для каждого предприятия. Поскольку ТОТЭ так же, как и АКБ, являются источниками постоянного тока, требуется наличие, как минимум, двух инверторов типа DC/AC для снабжения потребителей СХП электроэнергией от мини-ТЭЦ и системы накопления. При этом, если суммарное напряжение системы накопления отличается от напряжения мини-ТЭЦ, требуется согласующий преобразователь постоянного напряжения типа DC/DC .

Этап 6. Выбор резервного источника питания

Данный этап носит необязательный характер: в случае III категории бесперебойности электроснабжения наличие РИП не является обязательным условием. Основание для выбора РИП: выбранная мощность мини-ТЭЦ, суммарная

емкость системы накопления и данные о пиковой нагрузке предприятия. При наличии на СХП генерации биогаза целесообразным будет использование газовых электрогенераторов.

Заключение

Авторами сформулированы и изложены методические рекомендации по внедрению энергоэффективной системы генерирования электроэнергии с мини-ТЭЦ на ТОТЭ, системой накопления, системой преобразования, резервным источником питания в энергосистемы предприятий на примере СХП молочного животноводства.

Отмечены особенности применения предлагаемой системы генерирования электроэнергии с мини - ТЭЦ на ТОТЭ в действующих предприятиях АПК с учетом вида их деятельности, категории бесперебойности электроснабжения электроприемников предприятий и требований к качеству электроэнергии.

Библиографический список

1. Проект «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года». М., 2014. - URL: media.rspp.ru/document/1/c/e/ceef7d9d4df403f7f78fa3bd217d7285.pdf.
2. Официальный интернет-сайт компании BloomEnergy. 2014. [Электронный ресурс]. URL: bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide.
3. **Соснина, Е.Н.** Выбор мощности мини-ТЭЦ на ТОТЭ для электроснабжения сельскохозяйственных предприятий / Е.Н. Соснина, Л.Е. Веселов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2016. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3747

УДК 621.311.1

А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный**ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В настоящее время широкое распространение получили цифровые устройства релейной защиты, однако алгоритмическая база таких устройств практически полностью дублирует принципы электромеханических реле.

Предложен новый подход к разработке алгоритмов работы релейной защиты, основывающийся на выборе наиболее информативных признаков для распознавания аварийных режимов. Для отбора признаков применяется имитационное моделирование по методу Монте-Карло. Отмечены различные подходы к формированию уставок для предлагаемых алгоритмов и рекомендации по их выбору.

Nowadays spreading of digital relay protection devices is taking place. Nevertheless, the algorithms of these devices almost completely duplicate electromechanical relay protection equipment.

The new approach to the relay protection algorithms developing is proposed. The approach is based on choosing the most informative signs for emergency modes recognition. In order to select the signs the Monte Carlo method is used. Various approaches to settings choosing for the proposed algorithms and situations where they are expedient to use are marked.

Ключевые слова: релейная защита, информационный подход, имитационное моделирование, метод Монте-Карло

Key words: relay protection, Information approach, simulation modeling, Monte Carlo method.

В связи с переходом на микропроцессорные устройства релейной защиты появилась техническая возможность существенно усложнить алгоритмы РЗА [1]. В частности, вместо реализации множества простых защит по принципу работы аналогичных электромеханических реле можно построить алгоритмы наиболее оптимальным образом использующие информацию, поступающую от трансформаторов тока, напряжения, а также других устройств, установленных на защищаемом объекте [2], и на основе этой информации принимать решение о том, имеет ли место повреждение. Задачу по разработке наиболее эффективных алгоритмов распознавания аварийных режимов с использованием больших массивов входных данных ставит перед собой информационный подход к релейной защите [3].

В отличие от традиционных защит, которые, как правило, можно обосновать теоретически (например, увеличение тока в сети вследствие снижения полного сопротивления контура фаза-фаза или фаза земля [4] или возникнове-

ние токов нулевой последовательности из-за поперечной несимметрии, вызванной касанием фазного проводника земли [5]) основы функционирования информационной релейной защиты описать аналитически достаточно сложно по причине большого количества признаков, изменяющихся при изменении режима работы защищаемого объекта. Вместо этого производят «обучение» релейной защиты по результатам имитационного моделирования.

Процедуры распознавания с использованием различных признаков уже получили широкое распространение в диагностике, распознавании текста, речи, изображений (в том числе, компьютерное зрение) и т.д. [6]. В терминах машинного обучения релейная защита представляет собой классификатор, который относит режим защищаемого объекта к одному из классов заданного алфавита (нормальный режим, аварийный режим) по вектору признаков, состоящему из таких параметров, как токи, напряжения, мощность и т.д.

Многие традиционные виды защит также могут быть описаны с точки зрения информационного подхода. Например, классическая максимальная токовая защита – это классификатор, входной вектор которого представлен единственным признаком – амплитудой тока. Решающее правило алгоритма заключается в сравнении значения амплитудного признака с выбранной уставкой. Аналогично, дистанционная защита – это классификатор, который принимает вектор признаков, состоящий из двух значений (замер активного и реактивного сопротивления), и принимает решение о срабатывании на основе попадания точки в замкнутую область, образованную характеристикой срабатывания [7].

Наиболее простыми с точки зрения информационной релейной защиты являются одномерные алгоритмы (алгоритмы, использующие вектор признаков, включающих один параметр). При такой размерности, решающее правило можно задать лишь в виде отрезков или лучей, соответствующих областям срабатывания и несрабатывания. Основная трудность при построении одномерного алгоритма – отобрать наиболее информативный признак среди доступных для измерения. Один из способов решения данной проблемы – применение имитационного моделирования.

Целью данной статьи является демонстрация возможности применения имитационного моделирования для набора статистики и обучения релейной защиты. При этом производится отбор наиболее информативных признаков для одно- и двухмерной защит исследуемого участка сети.

Проиллюстрируем применение одномерной релейной защиты на примере участка сети, представленного на рис. 1.

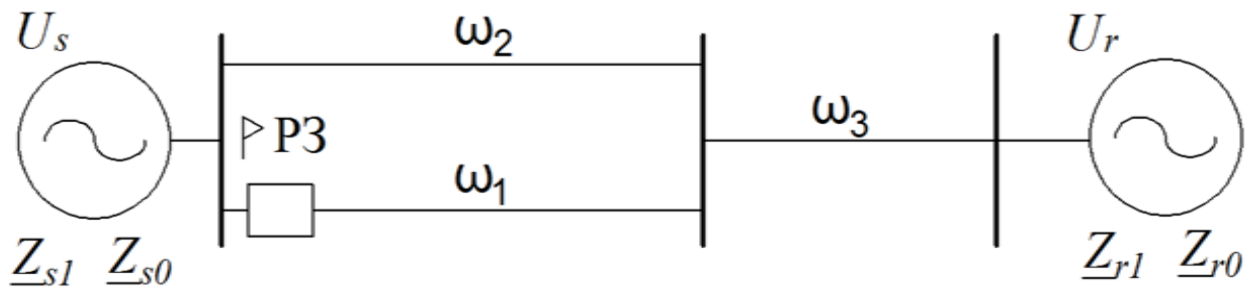


Рис. 1. Участок сети

Пусть в зону действия РЗ, отмеченной на рис. 1, попадает линия ω_1 . При этом линии ω_2 и ω_3 в зону не входят. Таким образом, цель данной релейной защиты – отличить КЗ на линии ω_1 от КЗ на линиях ω_2 и ω_3 . Также необходимо учесть, что ω_2 может находиться как в состоянии работы, так и быть отключенной. Для получения наиболее полной информации о возможных коротких замыканиях полагаем, что ряд параметров данного участка сети (напряжения и сопротивления систем s и r , а также место и переходное сопротивление КЗ) не постоянны, а являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону внутри определенного интервала.

На рис. 2 изображен пример распределений одного из признаков – амплитуды тока в рассматриваемых режимах.

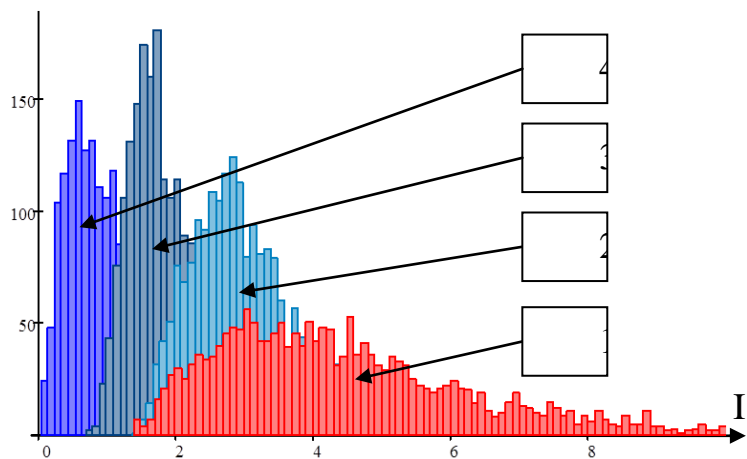


Рис. 2. Распределение амплитуды тока фазы А в моделируемых режимах:
 1 – КЗ на линии ω_1 ; 2 - КЗ на линии ω_3 (ω_2 включена); 3 - КЗ на линии ω_3 (ω_2 отключена);
 4 - КЗ на линии ω_2

Как видно из рис. 2, режимы, на которые защита должна реагировать перекрываются альтернативными. Лишь 24,5% коротких замыканий на линии ω_2 можно однозначно идентифицировать по амплитуде тока. Приведем статистику, полученную аналогичным способом для других признаков в табл. 1.

Таблица 1

Вероятности срабатывания одномерных защит, работающих по различным признакам

№	Признак	Вероятность срабатывания, %
1	Амплитуда тока поврежденной фазы	24,45
2	Амплитуда напряжения поврежденной фазы	0
3	Мнимая часть комплексного замера сопротивления	0
4	Действительная часть комплексного замера сопротивления	0
5	Угол между током и напряжением	0
6	Передаваемая активная мощность	19,35
7	Передаваемая реактивная мощность	2,25

Статистика показывает, что многие признаки вовсе не позволяют идентифицировать какие - либо короткие замыкания в основной зоне защиты.

Помимо одномерных алгоритмов, для задач релейной защиты можно применить двухмерные. Данный класс алгоритмов использует сразу два признака для распознавания. В таком случае удобно располагать области режимов на уставочной плоскости, отложив по координатным осям наблюдаемые признаки. Уставка такого рода защиты может быть описана как область срабатывания на уставочной плоскости. Пример распределения наблюдаемых режимов по уставочной плоскости изображен на рис. 3. В качестве признаков, образующих уставочную плоскость, выберем активный и реактивный замер сопротивления.

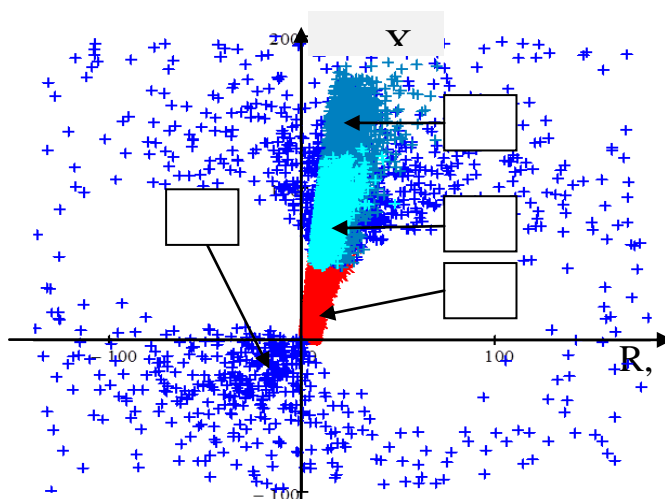


Рис. 3. Распределение амплитуды тока фазы А в моделируемых режимах:
 1 – КЗ на линии $\omega 1$; 2 - КЗ на линии $\omega 3$ ($\omega 2$ включена); 3 - КЗ на линии $\omega 3$ ($\omega 2$ отключена);
 4 - КЗ на линии $\omega 2$

В данном случае основные и альтернативные режимы пересекаются в меньшей степени, что позволяет распознать 82,65% процентов коротких замы-

каний. Также достаточно высокой распознающей способностью обладают пары признаков, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Вероятности срабатывания двумерных защит, работающих по различным уставочным плоскостям

№	Пара признаков	Вероятность срабатывания, %
1	Активный – Реактивный замер сопротивления	82,65
2	Амплитуда тока - Реактивный замер сопротивления	81,15
3	Реактивный замер сопротивления – Фазовый угол	73,75

Аналогично можно проводить оценку эффективности других одномерных и двумерных признаков с целью выявления наиболее эффективных с точки зрения распознавания аварийных режимов.

Выводы

1) применение современных микропроцессорных устройств релейной защиты позволяет реализовывать новые, более сложные алгоритмы защиты, объединяющие в себе несколько различных признаков;

2) результаты имитационного моделирования защищаемого объекта могут использоваться для набора статистики по его режимам и обучения алгоритма защиты;

3) целесообразно задачу релейной защиты свести к задаче классификации с применением методов машинного обучения;

4) увеличение размерности признакового пространства приводит к существенному увеличению эффективности распознавания.

Библиографический список

1. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон.— М.: Энергоатомиздат, 2007.— 543 с.
2. Подшивалин, А.Н. Практические аспекты реализации МЭК 61850-9-2 в микропроцессорных защитах / А.Н. Подшивалин, И.А. Капустина, И.Н. Николаев // Цифровая подстанция.— 2014.— № 1.— С.28 - 31.
3. Куликов, А.Л. Анализ реализаций информационного подхода в релейной защите / А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный // Релейщик. — 2016.— № 2.— С.28 - 33.
4. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 800 с.

5. **Папков, Б.В.** Токи короткого замыкания в электрических системах / Б.В. Папков. — Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2005. — 276 с.
6. **Christopher, M. Bishop.** Pattern Recognition and Machine Learning.— Berlin: Springer, 2006.— 738 p.
7. **Шнеерсон, Э.М.** Дистанционные защиты / Э.М. Шнеерсон.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 448 с.
8. **Лямец, Ю.Я.** Информационные аспекты обучения многомерной релейной защиты / Ю.Я. Лямец, Ю.В. Романов, И.С. Подшивалина // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы Всерос. научно-технич. конф.— Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010.— С. 214-217.
9. **Лямец, Ю.Я.** Многомерная релейная защита. Ч. 1. Теоретические предпосылки / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, Д.В. Зиновьев // Электричество.— 2009.— № 10.— С. 17-25.
10. **Лямец, Ю.Я.** Многомерная релейная защита. Ч. 2. Анализ распознающей способности реле / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, Д.В. Зиновьев // Электричество.— 2009.— № 11.— С. 9-15.
11. **Лямец, Ю.Я.** Обучаемая релейная защита / Ю.Я. Лямец, Д.В. Кержаев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы VII Всерос. научно-технич. конф.— Чебоксары, 2007.— С.185-188.
12. **Gose, E.** Pattern recognition and image analysis. / E. Gose. — Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1997. — 484 p.
13. **Witten, I. H.** Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques / I. H. Witten, E. Frank. — Amsterdam: Elsevier, 2005.— 525 p.

УДК 621.311.1

А.Л. Куликов, В.Ю. Осокин, М.Д. Обалин, Т.Р. Шарфеев**СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ДО МЕСТ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Воздушные линии являются наименее надежными элементами энергосистемы. Задача определения места повреждения (ОМП) относится к сложным, а часто и наиболее длительным операциям по восстановлению поврежденных участков или элементов электросети. Существующие методы ОМП обладают большой погрешностью и не позволяют точно определить места повреждений при двойных замыканиях на землю.

Предложены новые способы определения расстояний до мест двойных замыканий на землю как на одной, так и разных линиях электропередач в сети 6-35 кВ.

Transmission lines are the least reliable elements of the power system. In addition, the problem of fault location on transmission lines is the most difficult, and the most lengthy technological operation to restore damaged areas or items of supply. Modern methods of fault location have large errors, and do not allow to determine the exact location of the double earth fault.

The proposed methods for determining distances to the location of a double earth fault on both one and the other.

Ключевые слова: Двойное замыкание на землю, определение места повреждения, сеть с изолированной нейтралью, имитационное моделирование.

Key words: Double earth fault, fault location, network with isolated neutral, simulation model.

Обеспечение бесперебойного и надежного электроснабжения потребителей – важнейшая задача электросетевых компаний. Одной из ключевых проблем эксплуатации сетей среднего напряжения являются повреждения в сетях с изолированной нейтралью.

В электрических сетях среднего напряжения применяются, как правило, методы ОМП, основанные на одностороннем замере параметров аварийного режима [5 - 7], которые позволяют рассчитать расстояние до междуфазных повреждений.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) возможно определить с помощью дорогостоящих специализированных индикаторов (например, [1]), указывающих направление протекания емкостного тока замыкания, методов активного зондирования [8], волнового ОМП [9]. Особенность ОЗЗ – малые токи замыкания на землю и возможность работы потребителей в данном режиме длительное время. Однако большинство однофазных замыканий в сетях с изолированной нейтралью переходят в двухфазные замыкания и в двойные замыкания на землю (ДвЗЗ), при этом ДвЗЗ наименее чувствительны для релейной защиты.

Несмотря на многообразие предлагаемых программно-аппаратных средств, проблема ОМП при ДвЗЗ не имеет до настоящего времени общепризнанного решения [5 - 7], а современные методы, позволяющие рассчитать расстояние до мест замыканий, обладают большой погрешностью.

ОМП при двойных замыканиях на землю на одной линии

В основе разработанных методов ОМП при ДвЗЗ лежит имитационное моделирование и последующая статистическая обработка результатов [3, 4]. Приведем параметры имитационной модели и разработанных методов ОМП. Расчет расстояний до мест повреждений при ДвЗЗ на одной линии выполняется по схеме рис. 1.

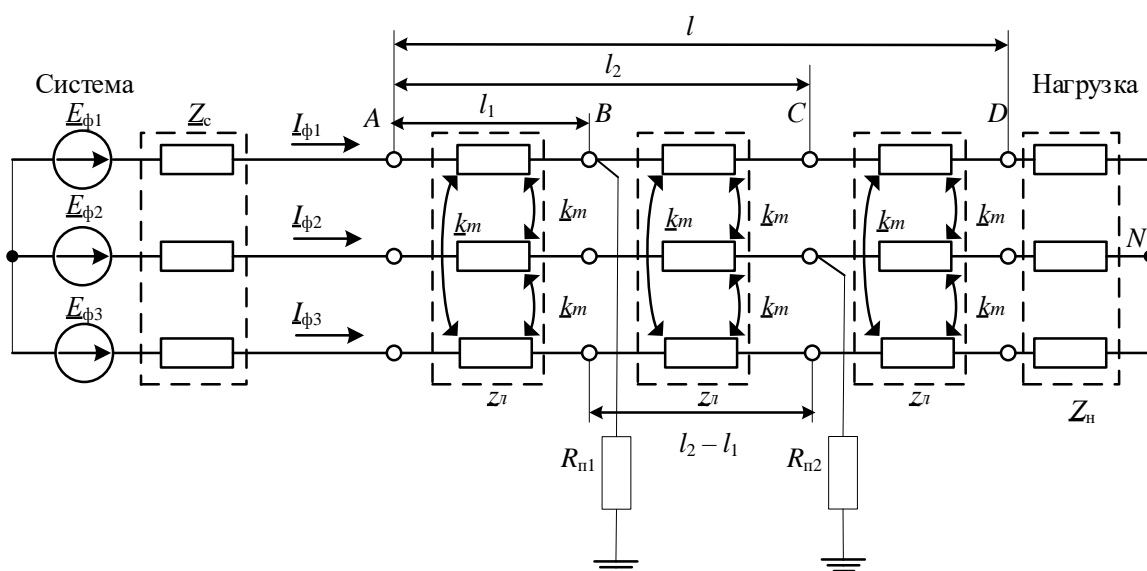


Рис. 1. Схема замещения сети в режиме двойного замыкания на землю на одной линии фазы $\Phi 1$ на расстоянии l_1 и фазы $\Phi 2$ на расстоянии l_2 :

$\vec{E}_{\Phi 1}, \vec{E}_{\Phi 2}, \vec{E}_{\Phi 3}$ – эквивалентные ЭДС системы; \vec{Z}_c – эквивалентное сопротивление системы;
 \vec{Z}_l – удельное сопротивление линии; k_m – коэффициент взаимной индукции;
 \vec{Z}_n – эквивалентное сопротивления нагрузки; $R_{п1}, R_{п2}$ – переходные сопротивления в местах замыканий; l_1, l_2 – фактические расстояния до мест ближнего и дальнего замыканий на землю; TA – измерительные трансформаторы тока; TV – измерительный трансформатор напряжения;

Решение схемы, представленной на рис. 1, в фазных координатах [2] позволяет получить выражения для определения расстояний до ближней и дальней точки повреждения на одной линии.

В общем виде расчетные выражения выглядят следующим образом:

$$l_1 = \frac{X_{\Phi 1}}{(x_l + x_{m2} + x_{m3})}; \quad (1)$$

$$l_2 = \frac{X_{\phi 2} - (x_{m1} + x_{m4}) \cdot l_1}{x_L}; \quad (2)$$

где $x_{m1} = \operatorname{Im} \left(z_m \cdot \frac{I_{\phi 1}}{I_{\phi 2}} \right)$; $x_{m2} = \operatorname{Im} \left(z_m \cdot \frac{I_{\phi 2}}{I_{\phi 1}} \right)$; $x_{m3} = \operatorname{Im} \left(z_m \cdot \frac{I_{\phi 3}}{I_{\phi 1}} \right)$; $x_{m4} = \operatorname{Im} \left(z_m \cdot \frac{I_{\phi 3}}{I_{\phi 2}} \right)$ –

сопротивления взаимной индукции соответствующих фаз; $X_{\phi 1}$, $X_{\phi 2}$ – расчетные индуктивные сопротивления, пропорциональные расстояниям до мест повреждений.

Расстояние до ближнего места повреждения l_1 определяется меньшим значением реактивного сопротивления поврежденных фаз.

Проверка предложенного способа ОМП при ДвЗЗ на одной линии проводилась по схеме рис. 2 путем моделирования рассматриваемого аварийного режима в программном комплексе *PSCad* и *Visual Basic*.

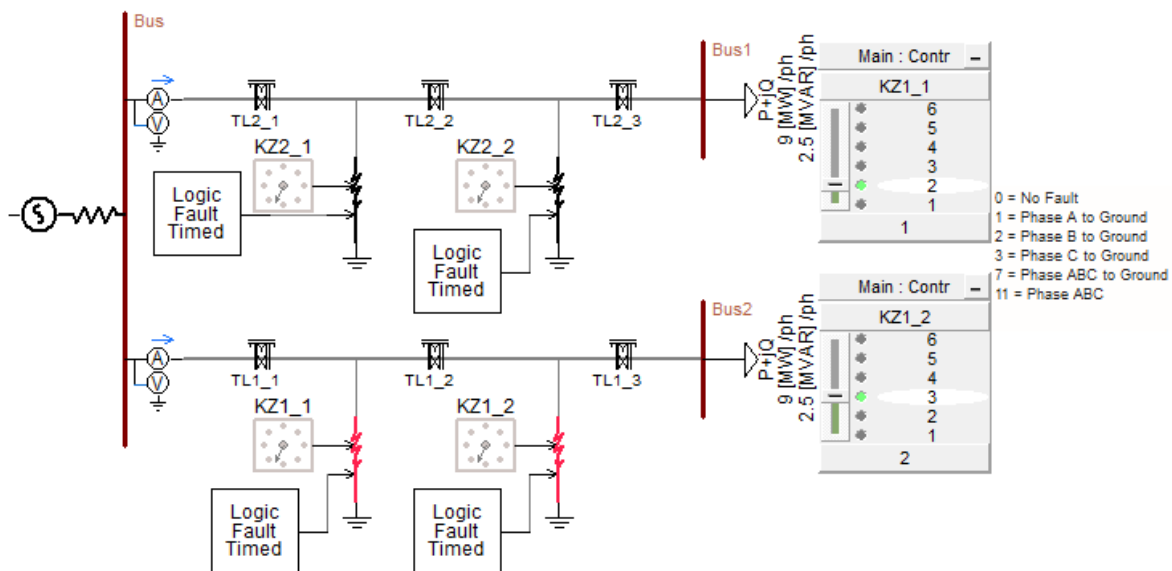


Рис. 2. Модель сети напряжением 35 кВ в *PSCad* при двойном замыкании на землю

Рассматриваемая схема имеет следующие параметры:

- напряжение сети 35 кВ;
- длина линии $L_1 = 10$ км, $L_2 = 10$ км;
- удельные сопротивления фазы $\underline{z}_l = 0.079 + j0.697$ Ом/км;
- удельное сопротивление взаимной индукции $\underline{z}_m = 0.0451 + j0.3536$ Ом/км;
- переходные сопротивления в местах замыканий определяются случайной величиной, распределенной по равномерному закону в диапазоне от 0 до 10 Ом;
- потребляемая мощность нагрузки $\underline{S}_n = 9 + j2.5$ МВА.

Для набора статистики в пакете *Visual Basic* был разработан алгоритм, позволяющий получать параметры установившегося режима при ДвЗЗ. Результаты моделирования в пакете *Visual Basic* идентичны результатам, полученным в *PSCad* в условиях установившегося режима. При этом переходное сопротивление в местах замыкания и расстояния до точек повреждений задавались произвольным образом из заданного диапазона для каждого расчета.

Результаты моделирования были обработаны в среде *Mathcad* и построены зависимости расчетных расстояний, полученных по формулам (1) и (2), от фактических значений (рис. 3).

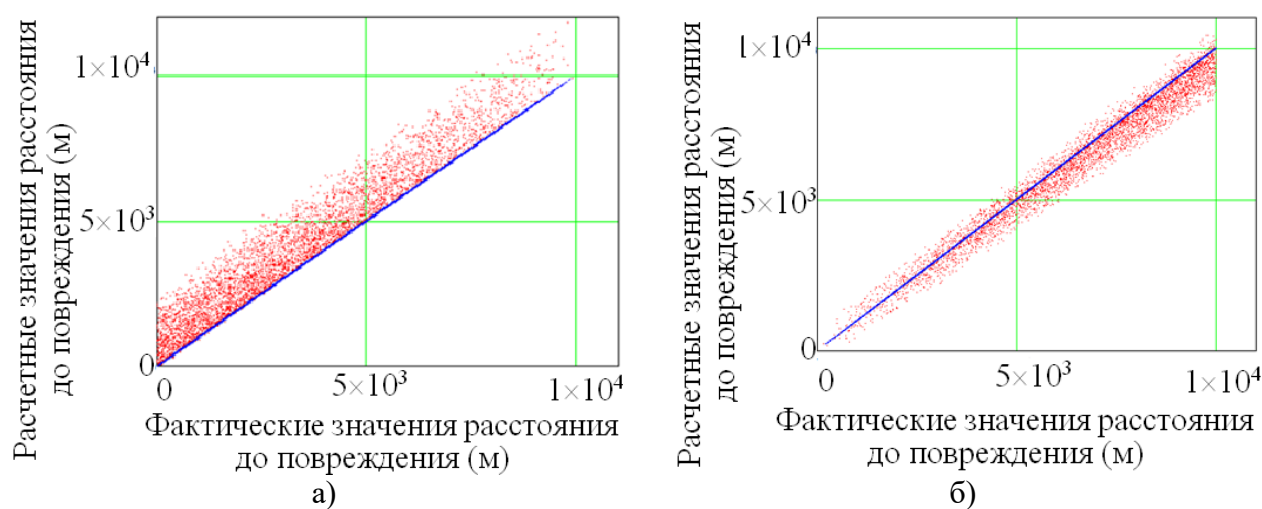


Рис. 3. Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения ЛЭП от фактических (а) и фактические значения расстояния (м) до повреждения (б)

Анализ полученных результатов показывает, что расстояние до ближней точки повреждения (рис. 3, а) определяется с относительной погрешностью, не превышающей 27%, при этом погрешность определения расстояний до дальней точки повреждения не превышает 17% (рис. 3, б).

ОМП при двойных замыканиях на землю на разных линиях

Аналогично представленной методике был разработан способ определения расстояний до точек повреждений при ДвЗЗ на разных линиях.

Обработка результатов моделирования позволила построить зависимости расчетных расстояний от фактических (рис. 4).

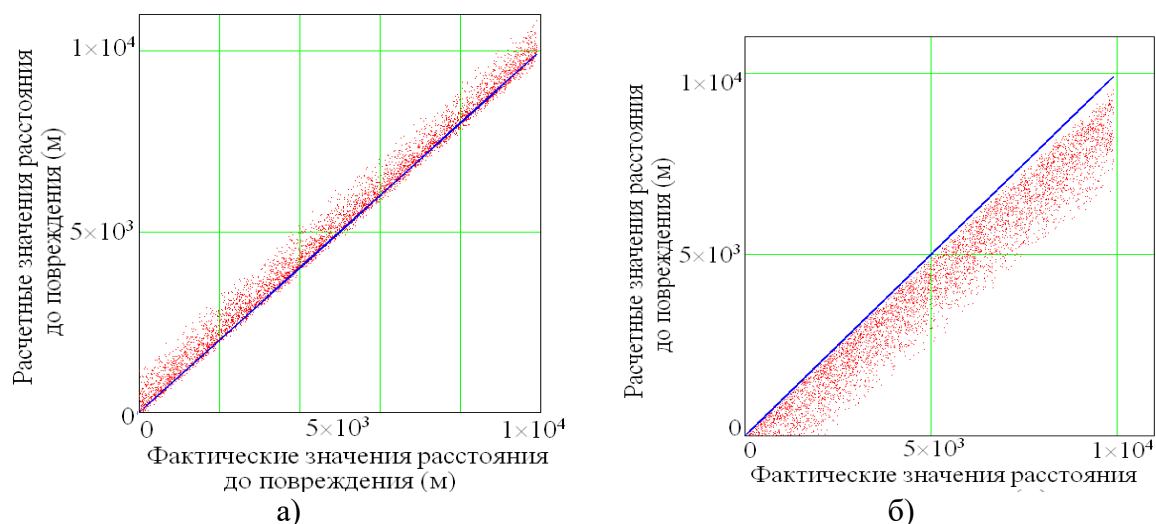


Рис. 4. Зависимость расчетных расстояний до точек повреждения ЛЭП от фактических (а) и фактические значения расстояния (м) до повреждения (б)

Анализ полученных результатов показывает, что расстояние до первой точки повреждения (рис. 4, а) определяется с относительной погрешностью не превышающей 12,5%, а погрешность определения расстояний до дальней точки повреждения (рис. 4, б) не превышает 26%.

Выводы

Предлагаемые методы ОМП позволяют определить факт возникновения двойного замыкания и сократить время их нахождения. Внедрение данных методов не требует серьезных финансовых вложений, так как они могут быть реализованы в современных микропроцессорных терминалах путем обновления на эксплуатируемых устройствах программного обеспечения.

Библиографический список

1. Геоинформационная система ОМП 6-35 кВ. [Электронный ресурс]. URL: www.relematika.ru www.relematika.ru/produkty/6-35_kv/sistema_omp_6-35_kv.
2. Папков, Б. В. Токи короткого замыкания в электрических системах : учеб. пособие / Б. В. Папков. – Нижний Новгород. : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2005. – 275 с.
3. Куликов, А. Л. Комплексные алгоритмы ОМП ЛЭП на базе статистических методов/ А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, П. А. Колобанов // Энергетик. – 2012. – №1. – С. 7-9.
4. Куликов, А. Л. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи/ А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, П. А. Колобанов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – №5. – С. 57-62.
5. Воробьева, Е. А. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ / Е. А. Воробьева [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 2. – С. 34 – 42.
6. Гловацкий, В. Г. Определение расстояния до мест двойных замыканий на землю в электрических сетях 35 кВ / В. Г. Гловацкий, А. Г. Халидов. // Энергетик. – 1985. – №9. – С. 31.

-
7. **Хакимзянов, Э. Ф.** Определение расстояний до мест двойных замыканий на землю на линии электропередачи распределительной сети среднего напряжения / Э. Ф. Хакимзянов, Р. Г. Мустафин, А. И. Федотов. // Изв. вузов. Проблемы энергетики. — 2015. — №3-4. — С.132-137.
 8. **Куликов, А. Л.** Дистанционное определение повреждений ЛЭП методами активного зондирования/ А. Л. Куликов. — М.: Энергоатомиздат, 2006. — 148 с.
 9. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А. Л. Куликов [и др.] // Электрические станции. — 2015. — №7(1008). — С. 45-53.

УДК 621.316.925.1

А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, П.С. Пелевин

ВАРИАНТЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ И СТУПЕНЧАТЫХ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются методы объединения волновых и традиционных (основанных на параметрах аварийного режима) защит, а также оценивается положительный эффект от их совокупного применения. Произведены результаты анализа преимуществ волновых защит, обсуждаются принципы комбинирования защит и их схемные решения.

Methods of combining travelling wave based and traditional (based on the parameters of the emergency mode) protections are considered, as well as the positive effect of their combined application. The results of the analysis of the advantages of wave protections are presented. The principles of combination of protections and their circuit solutions are discussed.

Ключевые слова: комбинированные защиты, волновые защиты, методы распознавания образов, цифровая обработка сигналов.

Key words: combined protection, travelling wave based protection, pattern recognition methods, digital signal processing.

Введение

Все чаще в электротехнической практике возникают ситуации, когда стандартные методы релейной защиты и автоматики (РЗА) становятся неэффективными. Например, существует ряд проблем при реализации защит в сетях с распределенными возобновляемыми источниками энергии, когда из-за особенностей их функционирования динамично изменяется режим сети (токи рабочего режима, токи КЗ, их направление, амплитуда и т.д.).

Цель статьи – исследование способов объединения защит, использующих как разные физические принципы, так и разные принципы построения цифровых блоков устройств РЗА, для компенсации недостатков отдельных защит и получения общего положительного эффекта.

Основные принципы объединения защит поясним с помощью упрощенной структурной схемы комбинированной защиты (рис. 1). Линии связи, изображенные на рис. 1 штриховой линией, могут отсутствовать в зависимости от вариантов организации защиты.

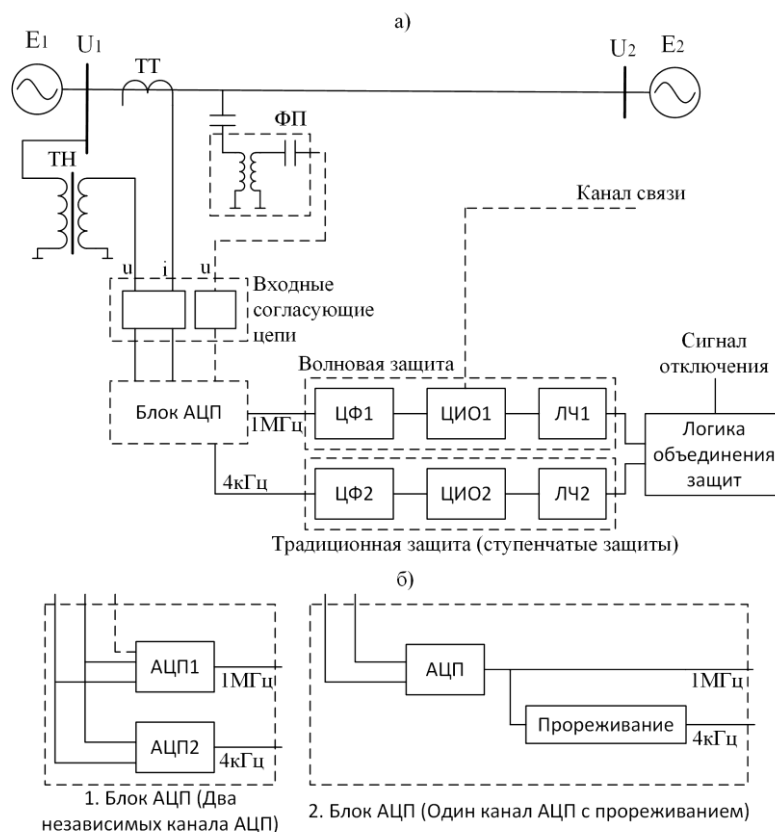


Рис. 1. Структурная схема комбинированной защиты (а) и способы исполнения аналого-цифрового преобразования (б)

После обработки сигналов в отдельных каналах защиты формируются управляющие сигналы и подаются на общую объединяющую логическую часть. Можно выделить два подхода построения логики объединения защит:

1) волновая защита является основной и действует независимо от традиционных защит, которые резервируют волновую защиту в определенных случаях [1, 2, 3].

2) объединение пусковых органов традиционных защит и дистанционного волнового органа. Первый подход с применением односторонних методов не всегда надежен, поэтому акцент сделан на этом подходе. Способы объединения защит рассматривались в ряде работ.

В алгоритме определения места повреждения (ОМП) [2] используется корреляционная обработка волновых сигналов. Рассчитывается кросскорреляция R_{s1s2} (рис. 3 – рис. 4) первой падающей волны с отраженными волнами $S1$ (рис. 3 – рис. 4). Определение расстояния до места повреждения осуществляется по времени максимального пика корреляции, после первого импульса (рис. 4 – рис. 5, верхняя шкала). В алгоритме предполагается, что определяемое волновым органом расстояние до места повреждения при КЗ на смежной линии (рис. 2, КЗ в точке $в$) будет больше, чем длина линии. Так, при КЗ на смежной линии максимальный пик корреляции должен наблюдаться в момент времени, соответствующем цифре 2 (рис. 3). Однако пик наблюдается в другой момент.

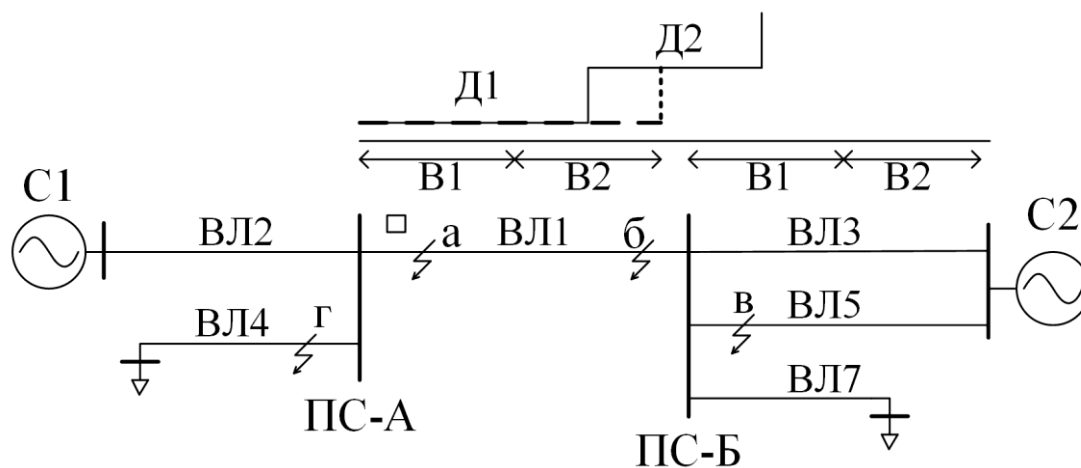


Рис. 2. Схема электрической сети 110 кВ:

КЗ на защищаемой линии (т. а) и КЗ на смежной линии (т. б), а также зоны комбинированной защиты на примере дистанционной защиты (ДЗ)

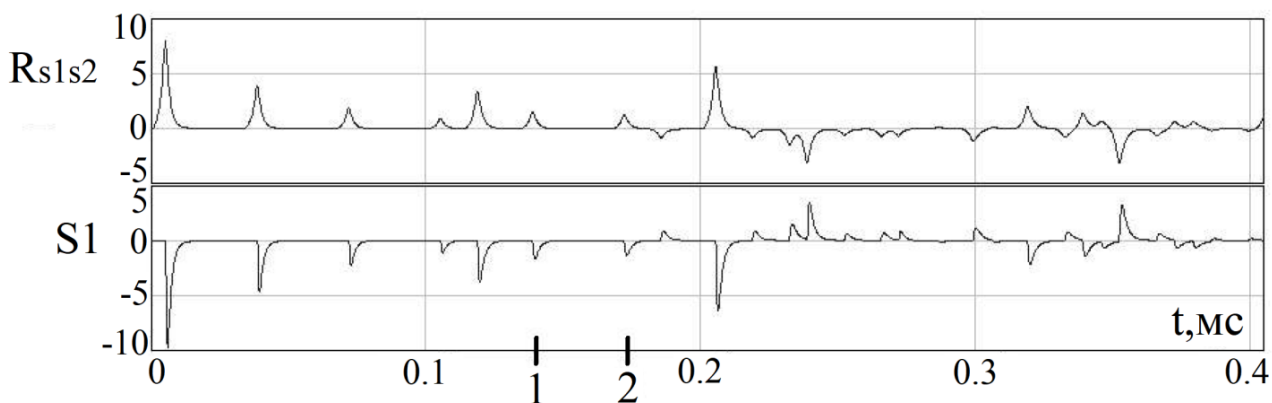


Рис. 3. Волновые импульсы при КЗ на смежной линии на расстоянии 5 км от шин (рис. 2, т. б)

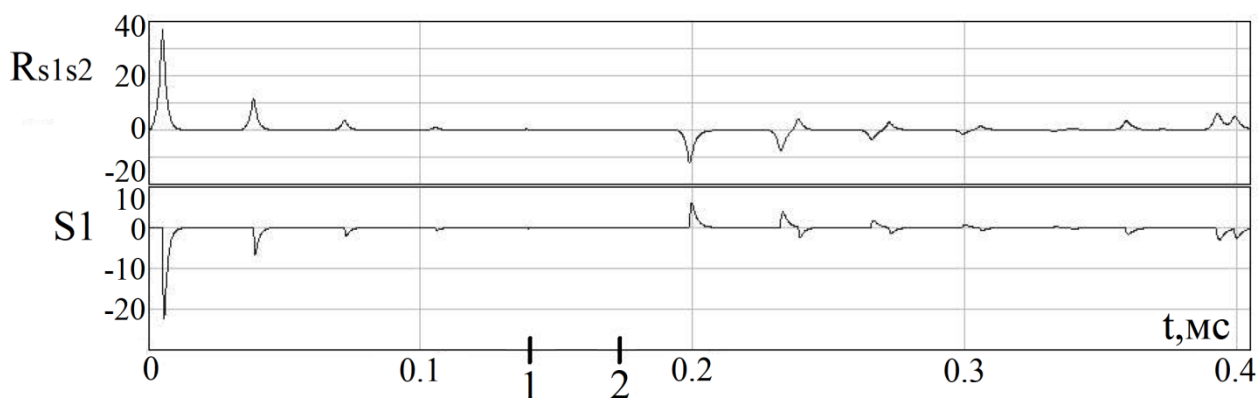


Рис. 4. Волновые импульсы при КЗ на защищаемой линии на расстоянии 5 км от шин (рис. 2, т. а)

Решить данную проблему частично возможно, введя дополнительные условия оценки сигнала.

Цифрой 1 на рис. 3 – рис. 4 отмечено время, при котором первая пришедшая волна, отразившись, движется в сторону смежной подстанции (ПС), отражается от шин смежной ПС и возвращается к месту замера. Оно определяется по выражению

$$t_1 = t_n + \frac{2LL}{v} \pm \Delta t, \quad (1)$$

где t_1 - ожидаемое время прихода волны (рис. 3 – рис. 4, т. 1); t_n - время прихода первой волны; LL - длина линии; v - групповая скорость распространения волн; Δt - погрешность задания параметров и определения времени прихода волны.

Цифрой 2 отмечено время, при котором первая пришедшая волна, отразившись, движется в сторону КЗ, отражается от места КЗ и возвращается к месту замера. Оно определяется по выражению

$$t_2 = t_{em} + \frac{2LL}{v} \pm \Delta t, \quad (2)$$

где t_2 - ожидаемое время прихода волны (рис. 3 – рис. 4, т. 2); $t_{вт}$ - время прихода второй волны.

Суть дополнительных условий заключается в следующем. При наличии волн достаточно сильной амплитуды в т. 1 и (или) 2 (рис. 3 – рис. 4) с учетом зоны погрешности (Δt), формируется вывод, что повреждение – на смежной линии электропередачи (ЛЭП), в противном случае – на защищаемой. При этом целесообразна блокировка использования условий при малой амплитуде первой волны.

Логическая схема предлагаемого авторами нового алгоритма объединения показана на рис. 5. В разработанном алгоритме рассчитывается расстояние до места повреждения на основе фиксации времени прихода волновых импульсов и разделяется на две зоны (рис. 2, В1 и В2). Зона В1 выбирается больше расстояния от начала смежной линии до конца зоны защиты второй ступени ДЗ (рис. 2, Д2) для блокировки ускорения второй ступени ДЗ (Д2) при КЗ на смежной линии. Зона В2 ограничивается длиной защищаемой линии с некоторой отстройкой во избежание неселективного действия защиты при КЗ на шинах смежной ПС.

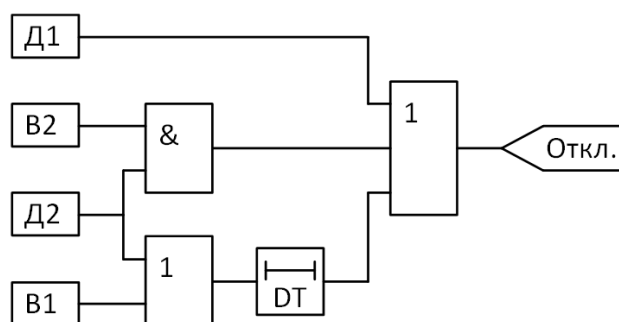


Рис. 5. Упрощенная логическая схема разработанного алгоритма защиты

Логика алгоритма следующая (рис. 3):

- при КЗ в зоне защиты первой ступени ДЗ (Д1) защита срабатывает без выдержки времени;
- при попадании КЗ в зону защиты второй ступени ДЗ (Д2) и во вторую зону волнового органа (В2) защита срабатывает также без выдержки времени, причем скорость срабатывания может быть быстрее, чем первой ступени ДЗ;
- при КЗ на смежной линии срабатывает вторая ступень ДЗ (Д2) и волновой орган определяет расстояние до места повреждения, входящего в зону (В1), при этом защита действует с выдержкой по времени, ускорения второй ступени ДЗ не происходит.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет расширить зону срабатывания быстродействующей ступени защиты ЛЭП с относительной селективностью. Незащищенной остается малая часть линии в связи с погрешностью волнового дистанционного органа, которая может составлять около 300-500 м. Аналогичным образом возможно реализовать комбинирование волновой защиты с токовыми (максимальная токовая защита (МТЗ), токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП) и т.д.).

Вывод

Проанализированы способы объединения волновых и традиционных защит, отмечены их преимущества по расширению зоны защиты и повышению быстродействия, которые при этом достигаются. На основе проведенных исследований на имитационных моделях разработан новый способ интеграции защит, позволяющий повысить их надежность.

Библиографический список

1. **Куликов, А. Л.** Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП: учеб. пособие / А. Л. Куликов, М. Ш. Мисриханов. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 198 с.
2. **Vajira Pathirana.** A power system protection scheme combining impedance measurement and travelling waves: software and hardware implementation: dissertation, Ph.D. – Manitoba, Canada. April 2004.
3. **Johns, A. T.** Digital protection for power systems / A. T. Johns, S. K. Salman. // Peter Peregrinus Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, UK. 1995. – 203 p.

УДК 621.316

А.Л. Куликов, Т.Р. Шарафеев, В.Ю. Осокин**МЕТОДЫ АНАЛИЗА КИБЕРНАПАДЕНИЙ НА ЭНЕРГОСИСТЕМУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Интеллектуализация электроэнергетических систем (ЭЭС) создает требуемую инфраструктуру для эффективной передачи, распределения и потребления электрической энергии и основывается на интеграции ЭЭС с информационными сетями. Существенные недостатки такой интеграции связаны с проблемами кибербезопасности, которые особенно остро ощущаются в последнее время.

Цель статьи – разработка алгоритмов противодействия кибернападением на энергосистему, основанных на непрерывном мониторинге параметров ЭЭС. Методы основываются на применении концепций теории игр и простого вероятностного классификатора Баеса. В качестве исходных данных принимаются множества аварийных режимов анализируемой электрической сети с поведением устройств РЗА и состоянием коммутационной аппаратуры.

Intellectualization of electric power systems (EPS) creates the required infrastructure for efficient transmission, distribution and consumption of electric energy, and is based on the integration of the EPS with information networks. Significant disadvantages of such integration are related to cybersecurity problems, which are particularly acute in recent years.

The aim of the article is to develop algorithms to counter cyber attacks on the power system, based on continuous monitoring of the parameters of the EPS. The methods are based on the application of game theory concepts and statistical methods of information processing. The initial data are taken to a variety of emergency conditions of electrical network and the behavior of relay protection devices and switching devices.

Ключевые слова: интеллектуальные электрические сети, кибератаки, кибербезопасность, короткое замыкание, линии электропередач, надежность, сценарии, трансформаторы и автотрансформаторы, установившиеся режимы работы, устройства релейной защиты, ущерб от кибератак, электроэнергетические системы.

Key words: smart grid, cyber-attacks, cybersecurity, short circuit, power lines, reliability, scripts, transformers and autotransformers, steady-state operation modes, relay protection devices, damage from cyber-attacks, power system.

1. Анализ кибернападений на энергосистему при помощи теории игр

Теория игр [3, 4] включает основанные на математических моделях процедуры принятия решений. Лица, принимающие решения, называются игроками, их взаимодействие – игрой.

Решить задачу анализа кибернападений на энергосистему можно, используя теорию игр и ее принципы поиска оптимумов для противоборствующих сторон. В нашем случае будет актуально изучение антагонистических игр, в которых интересы, преследуемые противниками (условно, диспетчер D подстан-

ции и атакующий злоумышленник А), резко различаются и примирение не может быть достигнуто ни в одной фазе (партии) игры. Такие игры характеризуются разным выходным эффектом – полезностью, в нашем случае будет характеризующаяся физическими последствиями кибернападения: отключение крупных потребителей, выход из работы участков сетей, повреждение дорогостоящего высоковольтного оборудования и др.

Исследуемая модель электрической сети представлена на рис. 1.

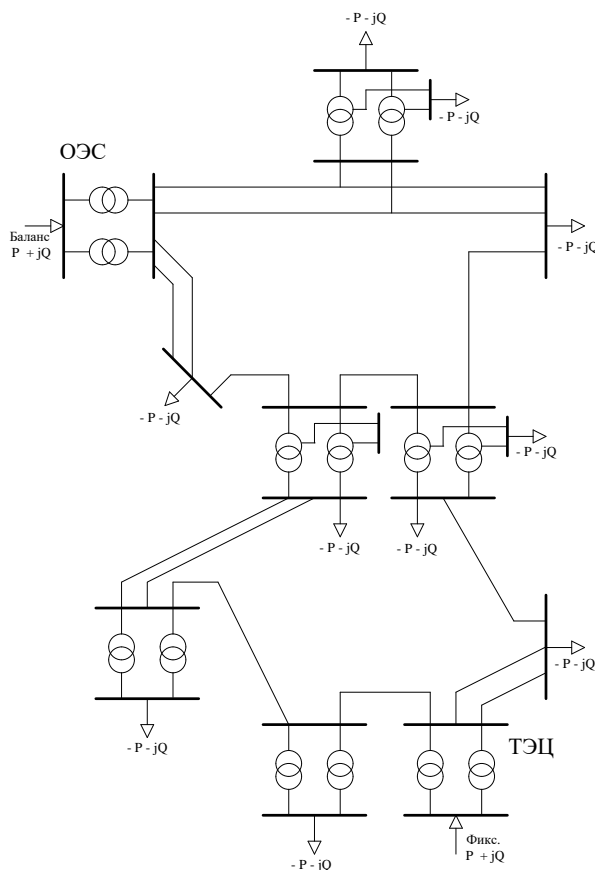


Рис. 1. Модель электрической сети для проведения экспериментов

Для дальнейшего анализа примем, что противники (игроки) собираются действовать исключительно в собственных интересах и наилучшим для себя образом. Тогда с целью поиска равновесных ситуаций для игрока D определим максиминную стратегию, а для игрока A будем определять минимаксную стратегию. Данные стратегии находятся по выражениям:

$$\begin{aligned} \underline{v} &= \max_{1 \leq i \leq K} \min_{1 \leq j \leq K} \{S_i \times S_j\} \\ \bar{v} &= \min_{1 \leq i \leq K} \max_{1 \leq j \leq K} \{S_i \times S_j\} \end{aligned} \quad (1)$$

где \underline{v} и \bar{v} - нижний и верхний пределы матричной игры между D и A (максимин и минимакс соответственно); $\{S_i \times S_j\}$ - исследуемая игровая ситуация на модели матрицы полезности P .

Оптимальное поведение будет описывать равновесными по Нэшу игровыми ситуациями. Оно достигается при равенстве максимина игрока D и минимакса игрока A . Иными словами, удовлетворяющие равновесию Нэша стратегии являются оптимальными (при стремлении сторон получить максимальную выгоду от игры) при условии, если обе стороны используют строго доминирующие стратегии в своем поведении. Нет смысла диспетчеру D отклоняться от использования равновесных стратегий, которые гарантируют ему минимальный проигрыш или выигрыш в игровом противостоянии. Для нашего случая равновесие Нэша опишем выражением

$$\underline{v} = \max_{1 \leq i \leq K} \min_{1 \leq j \leq K} \{S_i \times S_j\} = \min_{1 \leq i \leq K} \max_{1 \leq j \leq K} \{S_i \times S_j\} = \bar{v}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлена диаграмма с количеством исходов с нулевой полезностью (ось абсцисс) для стратегий $\{D_1, D_2, \dots, D_K\}$ игрока D . Стратегии представляют собой оптимальные ветви (линии электропередач), которые по условиям обеспечения кибербезопасности рекомендуется переключить на местное управление [1].



Рис. 2. Оптимальные стратегии по методу равновесия Нэша

Для проведения расчетов, наиболее приближенными к реальным противоборствам, предлагается метод итерационного решения матричных игр. Такой подход основан на процедуре последовательных приближений, имитирующей «проигрывание» некоторой условной партии игры. Каждый «ход» — каждый шаг этой процедуры состоит в выборе попеременно тем и другим участником игры одной из своих чистых стратегий, причем этот выбор основан на следующем принципе:

– если за N шагов игрок D (диспетчер) выбирал свои стратегии $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ раз, то его противник A на своем очередном шаге выбирает такую из чистых стратегий $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, которая является наилучшим ответом A на «эмпирическую» смешанную стратегию, определяемую по выражению

$$x^{(N)} = \left\{ \frac{p_1}{N}, \frac{p_2}{N}, \dots, \frac{p_n}{N} \right\}. \quad (3)$$

Аналогичным образом поступает игрок A (атакующий): если за N шагов A выбирал свои стратегии $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ соответственно $\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ раз, то D отвечает выбором чистой стратегии - одной из стратегий $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ наилучшим образом отвечающей на эмпирическую смешанную стратегию, определяемую по выражению

$$y^{(N)} = \left\{ \frac{q_1}{N}, \frac{q_2}{N}, \dots, \frac{q_m}{N} \right\}. \quad (4)$$

Первый «ход» может быть сделан любым из участников игры, который, в качестве первого выбора может принять любую из своих чистых стратегий. В остальных ходах (партиях) решения принимаются на основании актуальной цены партии в смешанных стратегиях, которая определяется произведением этой же цены в чистых стратегиях на вероятность использования выбранной стратегии.

Нижнее и верхнее значения игры определяются по выражениям:

$$\underline{v}_N = \min_i \frac{h_N(i)}{N}, \quad (5)$$

где $h_n(i)$ - элемент матрицы (строки) суммы исходов игры в соответствии с выбранными игроком D стратегиями;

$$\bar{v}_N = \max_j \frac{H_N(j)}{N}, \quad (6)$$

где $H_n(i)$ - элемент матрицы (строки) суммы исходов игры в соответствии с выбранными игроком A стратегиями;

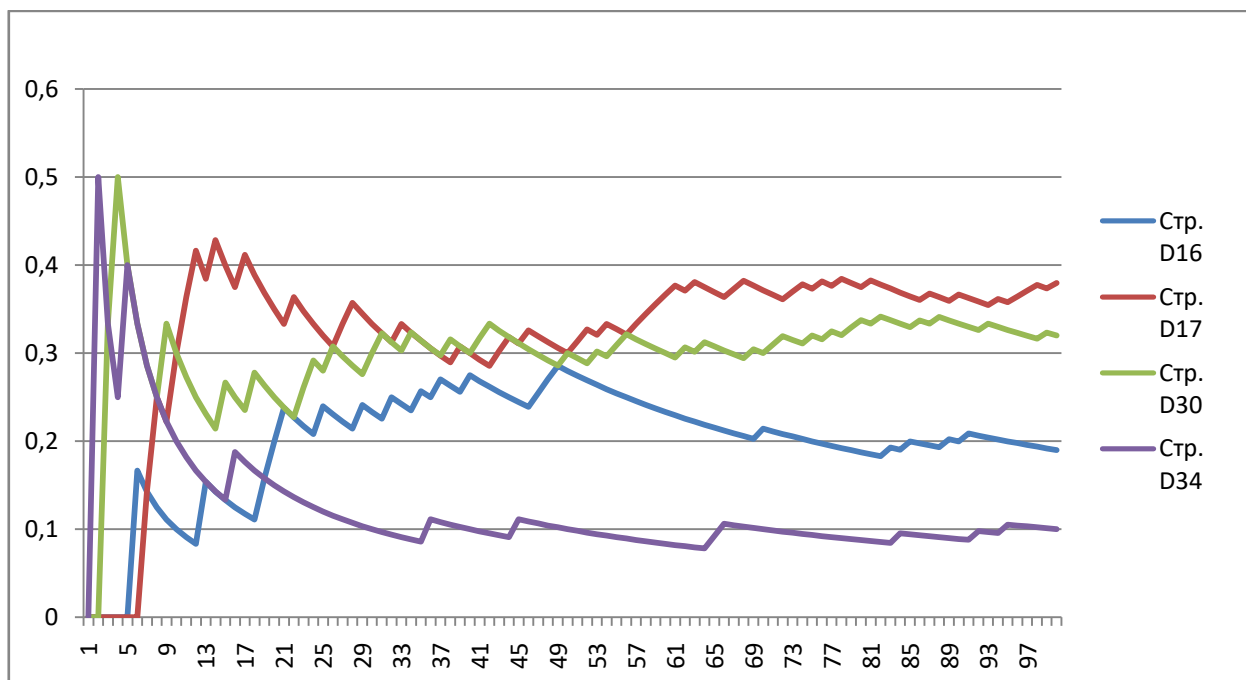


Рис. 3. Иллюстрация распределения вероятностей для игрока D

Для решения матричной игры в смешанных стратегиях был применен метод Брауна - Робинсона. Этот метод представляет собой итеративную процедуру построения последовательности пар смешанных стратегий игроков, сходящейся к решению матричной игры. Для определения цены игры в смешанных стратегиях используются результаты расчетов, полученных в виде распределений вероятностей выбора стратегий для игроков D и A . Диаграммы распределения вероятностей для игрока D представлена на рис. 3.

2. Анализ кибернападений на энергосистему при статистических методах обработки информации

Предлагаемый метод основывается на определении вероятности вмешательства в цифровую систему управления и защиты (ЦСУЗ) кабельной линии электропередач (кЛЭП) 6 - 35 кВ при помощи классификатора Байеса [2].

Модель ЦСУЗ линии представлена на рис. 4. Коммутационным аппаратам ($QS1$, $QS2$, Q), устройствам измерения (TV , TA), управления (АРМ диспетчера), защиты и автоматики (Терминал ЦРЗА) ставятся в соответствие в упрощенном варианте логические узлы [5], связь между которыми выполнена в стандарте МЭК 61850.

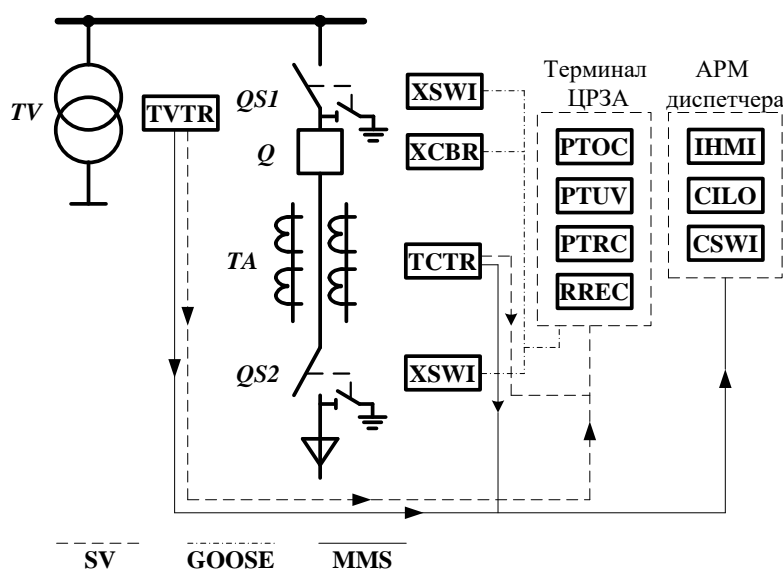


Рис. 4. Иллюстрация модели ЦСУЗ одиночной линии

Для выявления киберугроз в отношении присоединения к ЛЭП предлагается использовать классификатор Байеса [7]. Гипотезой s является «кибернападение», вероятность которого определяется набором событий $w_1, w_2 \dots w_n$. Эти события есть атрибуты логических узлов рассматриваемой ЦСУЗ. Для расчета вероятности кибернападения при наличии на входе фильтра произвольного набора событий производится по формуле

$$p(S|w_1, w_2 \dots w_n) = \frac{\prod_i p(S|w_i)}{\prod_i p(S|w_i) + \left(\frac{p(\neg S)}{p(S)}\right)^{1-N} \prod_i p(\neg S|w_i)}$$

Достоинствами данного метода является простота реализации, приемлемые качество и вычислительная сложность (при учете возможности обработки большого объема информации).

Применение данного метода позволяет обучить информационную систему всевозможным нормальным и аварийным ситуациям (КЗ с отключением и АПВ, оперативным переключениям, нежелательным или ошибочным действиям персонала и др.), которые могут быть использованы фильтром для определения вероятности несанкционированных операций с электрооборудованием посредством любых методов управления.

Выводы

1. При помощи концепции теории игр и общих правил борьбы в условиях конкуренции были получены оптимальные стратегии оборонительных действий для диспетчеров энергосистемы;

2. Применение методов классификации по Баесу позволяет подойти к определению вероятности кибернападения на энергообъекты. Такой подход отличается простотой реализации и удовлетворительным качеством принимаемых решений (рекомендаций оперативному персоналу подстанции).

Библиографический список

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью/ под ред. В. Е. Фортова, А. А. Мастерова. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.
2. **Папков, Б.В.** Киберугрозы и кибератаки в электроэнергетике: учебное пособие / Б. В. Папков, А. Л. Куликов, В. Л. Осокин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017. – 80 с.
3. **He, Wei.** A game theoretical attack-defense model oriented to network security risk assessment/ Wei He [et al.] / International Conference. Computer Science and Software Engineering, – V. 6 IEEE, 2008.
4. **Felegyhazi, M.** Game theory in wireless networks: A tutorial / M. Felegyhazi, J.- P. Hubaux. Technical Report LCA-REPORT-2006-002, – EPFL, 2006.
5. ГОСТ Р МЭК 61850-7-4-2011. Совместимые классы логических узлов и классы данных. – М.: Изд-во стандартов, 2011.

УДК 621.311.001.57

Б.В. Папков, А.Л. Куликов, М.Д. Обалин, Г.В. Майстренко

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ОШИБКИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ МНОГОСТОРОННЕМ ОМП

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Получившими наибольшее применение способами для определения места повреждения на линии электропередач (ЛЭП) являются методы одностороннего и двухстороннего замера по параметрам аварийного режима (ПАР). Для линий с ответвлениями методы одностороннего или двухстороннего замера оказываются недостаточны – используются методы многостороннего замера. Существуют различные методы многостороннего замера, со своими требованиями к исходным данным, алгоритмами функционирования и точностью результатов. Таким образом, необходимо провести сравнение функционирования и результатов различных методов для выявления особенностей их применения и сокращения возможной ошибки.

The ways which have received the greatest application for fault location on the power line, are methods of unilateral and bilateral measurement in the parameters of emergency state. For lines with branches, methods of unilateral or bilateral measurement are insufficient - methods of multilateral measurement are used. There are various methods of multilateral measurement, with the requirements to basic data, algorithms of functioning and accuracy of results. Thus, it is necessary to carry out comparison of functioning and results of various methods for identification of features of their application and reduction of a possible mistake.

Ключевые слова: определение мест повреждения линий электропередачи, имитационное моделирование, повышение точности ОМП ЛЭП.

Key words: fault location on the power networks, simulation modeling, increase in accuracy of fault location.

Введение

Наибольшее применимы способы для определения места повреждения (ОМП) на линии электропередач (ЛЭП) – методы одностороннего и двухстороннего замера по параметрам аварийного режима (ПАР), известные как в отечественной [1], так и в зарубежной практике [2]. При наличии ответвлений на линии методы, использующие односторонний или двухсторонний замер, недостаточны. В таких случаях применяют методы многостороннего замера.

Исследуемые методы

Задачу ОМП ЛЭП с ответвлениями можно разделить на две подзадачи: определение повреждённой секции и уточнение координаты повреждения на ней. Опишем подходы к решению каждой из задач при многостороннем ОМП.

1. Метод 1

В методе 1 [3] для решения первой подзадачи используется пошаговое эквивалентирование схемы слева, пока не обнаружен узел, принадлежащий поврежденной секции. Условие обнаружения узла (1)

$$\frac{|\dot{U}_{s.bi} - \dot{U}_{t.bi}|}{|\dot{U}_{s.bi}|} \cdot 100\% < k \quad (1)$$

где $\dot{U}_{s.bi}$ - напряжение в точке ветвления, посчитанное по данным со стороны линии; $\dot{U}_{t.bi}$ - напряжение в точке ветвления, посчитанное по данным со стороны ответвления; k - коэффициент, зависящий от погрешностей измерений тока и напряжения.

$$x = \frac{U_2'' - U_2' + I_2'' z_{1y0} L}{(I_2' + I_2'') z_{1y0}} \quad (2)$$

где U_2', U_2'' - напряжения обратной последовательности в начале и конце линии; I_2', I_2'' - токи обратной последовательности в начале и конце линии; z_{1y0} - удельное сопротивление прямой последовательности; L - длина линии.

Далее происходит аналогичное эквивалентирование справа для уточнения поврежденной секции. Для решения второй подзадачи применяется формула двухстороннего замера с использованием модулей величин (2).

2. Метод 2

В методе 2 [4] для решения первой подзадачи обобщается подход для линии с одним ответвлением. В точке ответвления считают величины евклидовых норм падений напряжения

$$\Delta_{i,j} = \|\dot{U}_{b,i} - \dot{U}_{b,j}\| \quad (3)$$

где $\dot{U}_{b,i}, \dot{U}_{b,j}$ - напряжения в точке отпайки, посчитанные по данным от начала, конца линии и ответвления.

Если $\Delta_{i,j}$ - минимальное значение подсчитанных разностей, то КЗ произошло на секции с номером, отличным от i и j .

Для решения второй подзадачи применяется формула двухстороннего замера с использованием суммы комплексных значений токов в качестве опорного.

$$x = \frac{\text{Im}\langle \dot{U}_1, \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \rangle}{\text{Im}\langle \dot{z}_1, \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \rangle} \quad (4)$$

где \dot{U}_1 - напряжение в начале линии; \dot{I}_1, \dot{I}_2 - токи в начале и конце линии соответственно; \dot{z} - матрица удельных сопротивлений линии.

3. Метод 3.

В методе 3 [5] для решения первой подзадачи применяется способ, аналогичный предыдущему, но в расчете не евклидовы нормы, а 1-нормы.

Для решения второй подзадачи применяется формула многостороннего замера без использования токовых измерений:

$$x = \frac{|\Delta \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_2 + LQ|}{|P + Q|}, \quad (5)$$

где P и Q – коэффициенты, рассчитанные специальным образом.

Имитационная модель

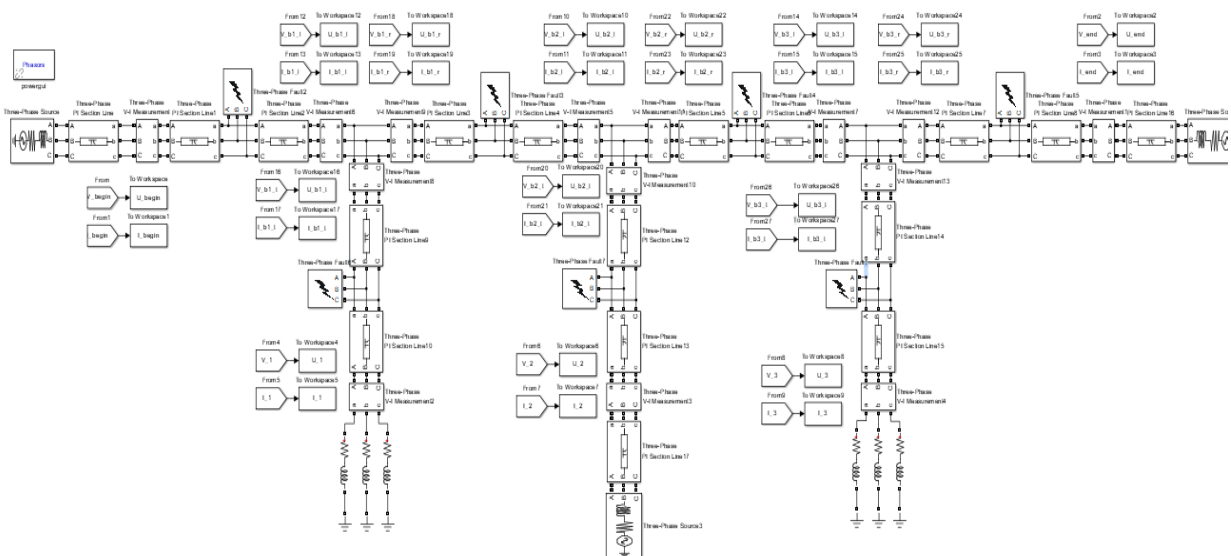


Рис. 1. Имитационная модель исследуемой ЛЭП

Имитационная модель для анализа методов 1 - 3 реализована в средах MATLAB и Simulink и представлена на рис. 1. Она представляет воздушную линию (ВЛ) напряжением 110 кВ, расчетная схема которой дана на рис. 2. Исходные данные для расчета заимствованы из [5].

Вычислительный эксперимент

В рамках вычислительного эксперимента проводилось моделирование КЗ на каждом из участков исследуемой линии с шагом 0,1 от длины участка. Для простоты в каждом случае моделировалось междуфазное замыкание А-В.

Каждый метод верно определил повреждённую секцию в 100% случаев. Выборка наиболее показательных результатов моделирования представлены в табл. 1.

Ошибки ОМП, полученные по результатам имитационного моделирования, могут быть скомпенсированы аналогично [6]. Для компенсации ошибок исключаются средние значения погрешностей методов из результата

$$x_{cor} = x - \Delta x_{med} \cdot \quad (6)$$

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

Участок	T_1-B_2			B_2-B_3			B_2-T_2			B_3-T_3			B_4-T_4			B_4-T_5			
Координата повреждения, км	1,55	7,75	13,95	1,68	8,40	15,12	1,22	6,10	10,97	1,44	7,20	12,96	1,44	7,20	12,96	1,82	9,10	16,38	
Метод 1	x , км	1,44	7,67	13,92	1,68	8,40	15,11	1,22	6,11	10,98	1,45	7,21	12,95	1,46	7,21	12,96	1,82	9,09	16,37
	Δx_{med} , %	-0,46			~0			~0			~0			~0					
	x_{cor} , км	1,51	7,75	13,99	1,68	8,40	15,12	1,22	6,10	10,97	1,44	7,20	12,96	1,44	7,20	12,96	1,82	9,10	16,38
	$\Delta x_{med,cor}$, %	~0			~0			~0			~0			~0					
Метод 2	x , км	1,55	7,75	13,95	1,68	8,40	15,12	1,48	6,47	11,48	1,44	7,19	12,96	2,17	8,22	14,32	1,82	6,47	11,48
	Δx_{med} , %	~0			~0			3,08			~0			7,19					
	x_{cor} , км	1,55	7,75	13,95	1,68	8,40	15,12	1,11	6,09	11,09	1,44	7,20	12,96	1,14	7,19	13,29	1,82	6,47	11,48
	$\Delta x_{med,cor}$, %	~0			~0			~0			~0			~0					
Метод 3	x , км	5,12	7,76	10,43	1,68	8,40	15,12	4,78	6,89	8,60	3,71	7,42	10,96	5,58	8,16	10,24	3,31	8,95	14,75
	Δx_{med} , %	11,58	-14,26		1,67	-7,33		18,15	-9,49		8,73	-7,99		17,96	-9,07		3,63	-5,94	
	x_{cor} , км	3,33	5,97	12,61	1,68	8,40	15,12	2,58	4,68	9,76	2,45	6,16	12,11	2,99	5,57	11,54	2,65	8,29	15,83
	$\Delta x_{med,cor}$, %	~0	~0		~0	~0		~0	~0		~0	~0		~0	~0		~0	~0	

Методика (6) может быть модифицирована. Например, участок линии можно разбить на подучастки или операцию провести итерационно.

Результаты

По итогам проведённых серий экспериментов можно сделать вывод, что методы 1 и 2 показывают хорошую вычислительную точность. Для метода 1 максимальная погрешность лежит в рамках 1% длины соответствующей секции. Метод 2 показывает аналогичную точность, однако на нагрузочных ответвлениях погрешность возрастает и может составлять порядка 10%. Метод 3, использующий при расчете расстояния только данные по напряжению, показывает приемлемую точность ближе к середине каждого участка, тогда как ближе к началу или концу секции погрешности могут достигать 30%.

Компенсация погрешности по (6) проиллюстрирована эapurой распределения ошибки по длине секции В4-Т4 (рис. 3):

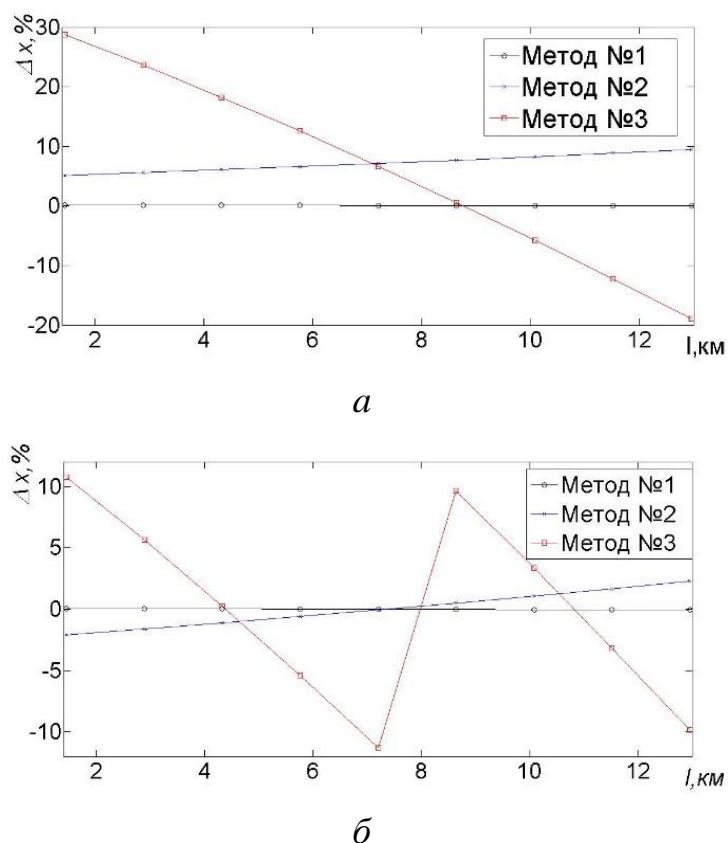


Рис. 3. Эпюра распределения ошибки вдоль линии:
a – без компенсации; *б* – с компенсацией

Компенсация ошибки фактически не повлияла на точность метода 1, так как среднее значение ошибки метода и до компенсации было близко к нулю. Метод 2 до компенсации имел среднее значение ошибки в 7,19%, после – 0%. Для компенсации ошибки метода 3 была использована модифицированная методика с разбиением секции на два подучастка по половине длины. До компенсации среднее значение ошибки на первом подучастке равнялось 17,96%, на втором – 9,07%, после компенсации – 0% на обоих участках. Отметим, что после однократной компенсации ошибки, её максимальное значение на участке

сократилось более чем в 2 раза (с 28,77% до 10,3%). Для дальнейшего снижения погрешности необходимо итерационно повторять процедуру – разбивать на подучастки участки, содержащие точку перемены знака погрешности, и вычитать среднее значение погрешности из результатов на каждом участке. Таким образом, на основании подробной имитационной модели линии и статистических методов обработки данных можно добиться повышения точности процедуры ОМП.

Отдельно заметим, что предложенная методика компенсации снижает именно среднее значение погрешности на участке. При этом значения в некоторых точках (в которых погрешность до компенсации близка к нулю) после однократной компенсации могут сильнее отличаться от истинных, но в среднем по длине погрешность, безусловно, снижается.

Библиографический список

1. **Аржанников, Е. А.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи; под ред. В. А. Шуина / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов. – М. : Энергоатомиздат, 2003.
2. **Saha, M. M.** Fault Location on Power Networks / M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski. – London : Springer, 2010.
3. **Куликов, А. Л.** Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями / А. Л. Куликов [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 9 (76). – С. 29 – 38.
4. **Abe, M.** Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines / M. Abe [et al.] // IEEE Trans. Power Del., – 1995. – V. 10. – N. 1. – P. 159–168.
5. **Brahma, S. M.** Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements / S. M. Brahma // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – V. 20. – N. 2. – Pt. 2, – P. 1325–1331.
6. **Куликов, А. Л.** Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи / А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, П. А. Колобанов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. - №5. – С. 57 – 62.

УДК 621.3

Н.С. Маслова, А.А. Севостьянов**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ: ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрено влияние отклонений показателей качества электрической энергии от допустимых значений на работу и режимы электроэнергетической системы. Проанализирована электромагнитная составляющая, обусловленная низким качеством электрической энергии. Рассмотрены отклонение частоты, несимметрия и несинусоидальность напряжения. Приведены устройства оптимизации режимов сети.

The article considers the influence of deviations in the quality of electrical energy from the permissible values for work and the regimes of the electric power system. The electromagnetic component due to the low quality of electric energy is analyzed. Frequency deviation, asymmetry and non-sinusoidal voltage are considered. Devices for optimizing network modes are presented.

Ключевые слова: электрическая сеть, электромагнитная совместимость, потери, качество, показатель, напряжение, отклонение, устойчивость, оптимизация, режим.

Key words: electrical network, electromagnetic compatibility, loss, quality, indicator, voltage, deviation, stability, optimization, mode.

Одной из главных задач в современной энергетике является обеспечение возможности функционирования технических средств с заданным качеством. Показатели качества электрической энергии численно характеризуют уровни электромагнитной совместимости в системе электроснабжения по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой, симметрии и импульсам напряжения. Под электромагнитной совместимостью понимается способность технических средств функционировать с заданным качеством и не создавать недопустимых помех другим техническим средствам [1]. Таким образом, поддержание качества электрической энергии на уровне нормально-допустимых значений обеспечивает оптимальную, экономически эффективную работу электрической системы. Низкое качество электрической энергии, помимо нарушения работы систем электроснабжения, приводит к дополнительным потерям электрической энергии и нарушению нормальной эксплуатации технических средств.

Ущерб, обусловленный низким качеством электрической энергии, можно разделить на две составляющие: электромагнитную и технологическую. Технологическая составляющая ущерба характеризуется влиянием качества напряжения на изменение производительности технологических установок и (или) сни-

жение ее качества. Увеличение потерь активной мощности в сети, сокращение срока службы изоляции электрооборудования, рост потребления активной и реактивной мощности электроприемниками – составные части электромагнитной составляющей. Более детальный анализ влияния отклонений показателей качества на величину электромагнитной составляющей приведен в табл. 1 [2].

Таблица 1

Влияние отклонений показателей качества на электромагнитную составляющую

ПКЭ	Электромагнитная составляющая
Отклонение частоты, δf	1 – увеличение потребления активной и реактивной мощности; 2 – увеличение значения потерь активной мощности в сети и ЭП; 3 – сокращение срока службы
Отклонение напряжения, δU	Изменение потерь напряжения, вызванное изменением мощностей нагрузок
Колебания напряжения	При увеличении нагрузки растут потери напряжения в ЭС, питающей эту нагрузку
Несинусоидальность напряжения	1 – увеличение потерь активной мощности; 2 – увеличение потребления активной и реактивной мощности; 3 – ускорение процесса старения изоляции электрооборудования; 4 – ограничение области применения конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности
Несимметрия напряжения	1 – увеличение потерь активной мощности; 2 – увеличение потребления активной и реактивной мощности; 3 – ускорение процесса старения изоляции электрооборудования; 4 – недовыработка конденсаторами и синхронными машинами реактивной мощности; 5 – сокращение срока службы светильников

В связи со значительным влиянием качества электрической энергии на работу и режимы электроэнергетической системы, его обеспечение становится основной приоритетной задачей в области электроснабжения.

Частота является общесистемным параметром, поэтому к данному показателю качества предъявляются, пожалуй, самые строгие требования. Изменение частоты вызывает нарушение нормальной работы электродвигателей, трансформаторов и других электроприемников – вплоть до их выхода из строя. Значение частоты в любой момент нормального режима одинаково во всех точках сети и принято единым показателем качества. Уровни напряжения могут различаться, поэтому необходим анализ напряжения на каждом отдельно взятом участке сети. Для анализа показателей качества можно использовать их взаимосвязь с балансами мощностей:

$$\sum P_{\Gamma} = \sum P_{\text{н}} + \sum \Delta P_{\text{с}} + \sum \Delta P_{\text{с.н.}}, \quad (1)$$

$$\sum Q_{\Gamma} = \sum Q_{\text{н}} + \sum \Delta Q_{\text{с}} + \sum \Delta Q_{\text{с.н.}} \pm \sum Q_{\text{КУ}} - \sum Q_{\text{ген}}. \quad (2)$$

При определенных значениях частоты и напряжения в электроэнергетической системе устанавливается баланс мощностей. Нарушение баланса в системе, а следовательно, изменение параметров, характеризующих качество электрической энергии, может произойти как при изменении нагрузки, так и при изменении генерации.

Рассмотрим случай нарушения баланса мощностей вследствие изменения генерации активной и реактивной мощности на величину ΔP_{Γ} и ΔQ_{Γ} , при этом частота f изменится на Δf , а напряжение U на ΔU :

$$\Delta P_{\Gamma} = \frac{\partial \sum P_{\text{н}}}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial \sum P_{\text{н}}}{\partial U} \Delta U, \quad (3)$$

$$\Delta Q_{\Gamma} = \frac{\partial \sum Q_{\text{н}}}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial \sum Q_{\text{н}}}{\partial U} \Delta U. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) определяют связь между изменением генерируемых мощностей ΔP_{Γ} , ΔQ_{Γ} , и параметрами Δf , ΔU при неизменной нагрузке и позволяют определить отклонение показателей качества электроэнергии от начальных значений частоты и напряжения. При сбросе генерирующей мощности ($\Delta P_{\Gamma} < 0$) в энергосистеме наблюдается снижение частоты и напряжения, при увеличении мощности ($\Delta P_{\Gamma} > 0$) частота возрастает. Изменение режима по реактивной мощности сказывается на изменении уровней напряжения по системе и практически не влияет на изменение частоты. Снижение $\sum Q_{\Gamma}$ приводит к понижению напряжения на шинах генератора и в системе в целом, а увеличение ΔQ_{Γ} – к повышению напряжения. Аналогично можно рассмотреть случай изменения нагрузки ($\sum P_{\text{н}}$, $\sum Q_{\text{н}}$). Рост нагрузки равносителен снижению генерации. Увеличение $\sum P_{\text{н}}$ приводит к снижению частоты, увеличение $\sum Q_{\text{н}}$ в основном к снижению напряжения.

Требования к параметрам качества электроэнергии обуславливают необходимость применения мероприятий по регулированию баланса мощностей. В установившемся режиме частота во всех точках энергосистемы принимает одно и то же значение, поэтому осуществлять регулирование частоты можно в любой точке, а ее уровень будет зависеть от баланса активной мощности в целом по системе. Баланс реактивной мощности следует проверять более детально, по отдельным районам и узлам, применяя как местное, так и централизованное регулирование [3, 4].

При наличии несинусоидального напряжения возможно появление резонанса токов в цепи батареи конденсаторов (далее БК) – внешняя сеть на частотах высших гармоник. При этом возникает перегрузка по току и мощности – вплоть до выхода из строя БК. Поэтому эксплуатация конденсаторов возможна

при применении ряда мероприятий. При несинусоидальности напряжения конденсаторные установки должны быть защищены от проникновения в них высших гармоник с помощью реакторов или включения в цепи фильтров высших гармоник. Следует отметить, что использование БК позволяет снизить потери мощности.

При несимметрии напряжения нарушается работа электрических машин, уменьшается срок их службы, снижается КПД. Ухудшается работа трехфазных вентильных мостов (выпрямителей). Ввиду различия величины фазных напряжений растет пульсация выпрямленного напряжения. Кроме того, несимметрия отрицательно сказывается на системе импульсно-фазового управления тиристорными преобразователями. Так же неравномерно загружаются по фазам конденсаторные батареи, в связи с чем становится невозможным их полное использование. При этом батареи увеличивают несимметрию нагрузки, выдавая большую реактивную мощность в тех фазах, где выше напряжение, то есть меньше нагрузка. Несимметрия напряжения сказывается и на осветительных установках, поскольку включены на фазы либо с пониженным напряжением, либо с повышенным [3, 5].

Для поддержания качества электрической энергии на уровне нормируемых значений необходимо применять устройства оптимизации режимов сети, позволяющих также повысить пропускную способность сетей и уменьшить потери на электропередачу. К ним относятся:

1. Устройства продольной компенсации:

- устройства управляемой продольной компенсации;
- фазоповоротные устройства (ФПУ);
- асинхронизированные компенсаторы.

2. Устройства поперечной компенсации:

- управляемые шунтирующие реакторы различных типов;
- статические тиристорные компенсаторы;
- статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ);
- асинхронизированные компенсаторы.

3. Устройства векторного регулирования:

- объединенные регуляторы потоков мощности (ОРПМ);
- ФПУ в сочетании с одним из устройств поперечного регулирования.

4. Вставки постоянного тока – для объединения энергосистем [4].

Библиографический список

1. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014 – М: Стандартинформ, 2014. – С. 1 - 16.
2. **Пивняк, Г. Г.** Расчеты показателей электромагнитной совместимости: учеб. пособие / Г. Г. Пивняк, И. В. Жежеленко, Ю. А. Папаика. – Днепропетровск: НГУ, 2014. – С. 8 - 20.
3. **Александров, Д. С.** Надежность и качество электроснабжения предприятий: учеб. пособие / Д. С. Александров, Е. Ф. Щербаков. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 71 - 77.
4. **Бурман, А. П.** Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учеб. пособие / А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – С. 14 - 71.
5. **Ананичева, С. С.** Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособие / С. С. Ананичева. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 16 - 21.

УДК 621.311.1

А.В. Шалухо, Н.И. Эрдили, А.Е. Чиркова

**ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ
ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрены возможные сферы применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В виде алгоритма представлена последовательность действий по установке и подключению ВИЭ к автономному потребителю. Рассмотрены направления повышения эффективности использования ВИЭ.

The article deals with the possible spheres of application of renewable energy sources (RES). In the form of an algorithm, a sequence of actions is presented for installing and connecting RES to an autonomous consumer. Areas of increasing the efficiency of RES use are considered.

Ключевые слова: автономные потребители, возобновляемые источники энергии, виртуальная электростанция.

Key words: autonomous consumers, renewable energy sources, virtual power plant.

По статистическим данным ежегодно у нескольких сотен крупных потребителей возникают серьезные проблемы с получением электроэнергии. Так, летом 2017 г. без электроснабжения оставались потребители в 61 населенном пункте (в том числе, 43 социально значимых объекта). Наиболее часто нарушения электроснабжения и дефицит электрической мощности наблюдается у так называемых автономных потребителей, не имеющих связей с централизованной электрической сетью.

Централизованное электроснабжение отсутствует более чем на половине территории России (районы Крайнего Севера, Дальнего Востока и Восточной Сибири), где проживает около 20% населения страны. Кроме того, остается неэлектрифицированной существенная доля фермерских хозяйств, садоводческих участков, леспромхозов, а также местных производств.

Повышение качества электроснабжения автономных потребителей является актуальным направлением электроэнергетической политики России. Важная роль в решении этой задачи отводится возобновляемым источникам энергии (ВИЭ).

В отличие от энергоустановок на органическом (как правило, привозном) топливе, которые требуют относительно небольших капитальных затрат при высоких эксплуатационных издержках, энергоустановки на ВИЭ (из-за малой плотности потоков энергии) характеризуются значительными капитальными

затратами, но низкими эксплуатационными издержками и отсутствием топливной составляющей. Это делает перспективным совместное использование традиционных источников малой мощности (дизельных электростанций) и энергоустановок, использующих энергию ветра, солнца, малых рек и т.д. В этом случае значительно снижается топливная составляющая в себестоимости вырабатываемой электроэнергии и повышается надежность электроснабжения.

На рис. 1 представлен порядок установки и подключения ВИЭ.

Так, строительство ветроэнергетической установки (ВЭУ) не требует больших капитальных вложений и осуществляется за достаточно короткий срок. ВЭУ 10 МВт на суше может быть построена за 2 месяца, причем основное время уходит на строительство фундамента. Монтаж установки длится всего около трех дней. ВЭУ 50 МВт может быть построена за 18 или 24 месяца [1]. Этот срок включает в себя измерение скорости ветра на территории (минимум полгода). Само же строительство ВЭУ занимает около 6 месяцев. Таким образом, ветряная станция может быть построена в среднем за 9 месяцев, парк солнечных батарей – за 3 - 6 месяцев, в то время как на строительство угольной или газовой станции уходит несколько лет [2].

Однако установка и подключение ВИЭ по данному алгоритму предполагает использование вырабатываемой электроэнергии только конкретным потребителем-собственником. Более эффективным представляется использовать ВИЭ для питания не только собственной нагрузки, но и соседних потребителей. В данном случае электрическая сеть должна функционировать по принципам виртуальной электростанции (ВиЭС).

ВиЭС – это управляемая система, объединяющая разнохарактерные источники малой генерации, в том числе ВИЭ, с накопителями электроэнергии и активными потребителями [3]. Предполагается, что ВиЭС должна иметь подключение к централизованной электрической сети. Однако принципы построения ВиЭС могут быть использованы и в автономных системах электроснабжения.

Развитие технологий ВиЭС позволит повысить эффективность использования ВИЭ, участвовать отдельным потребителям и собственникам энергоустановок на локальном рынке электроэнергии [4].

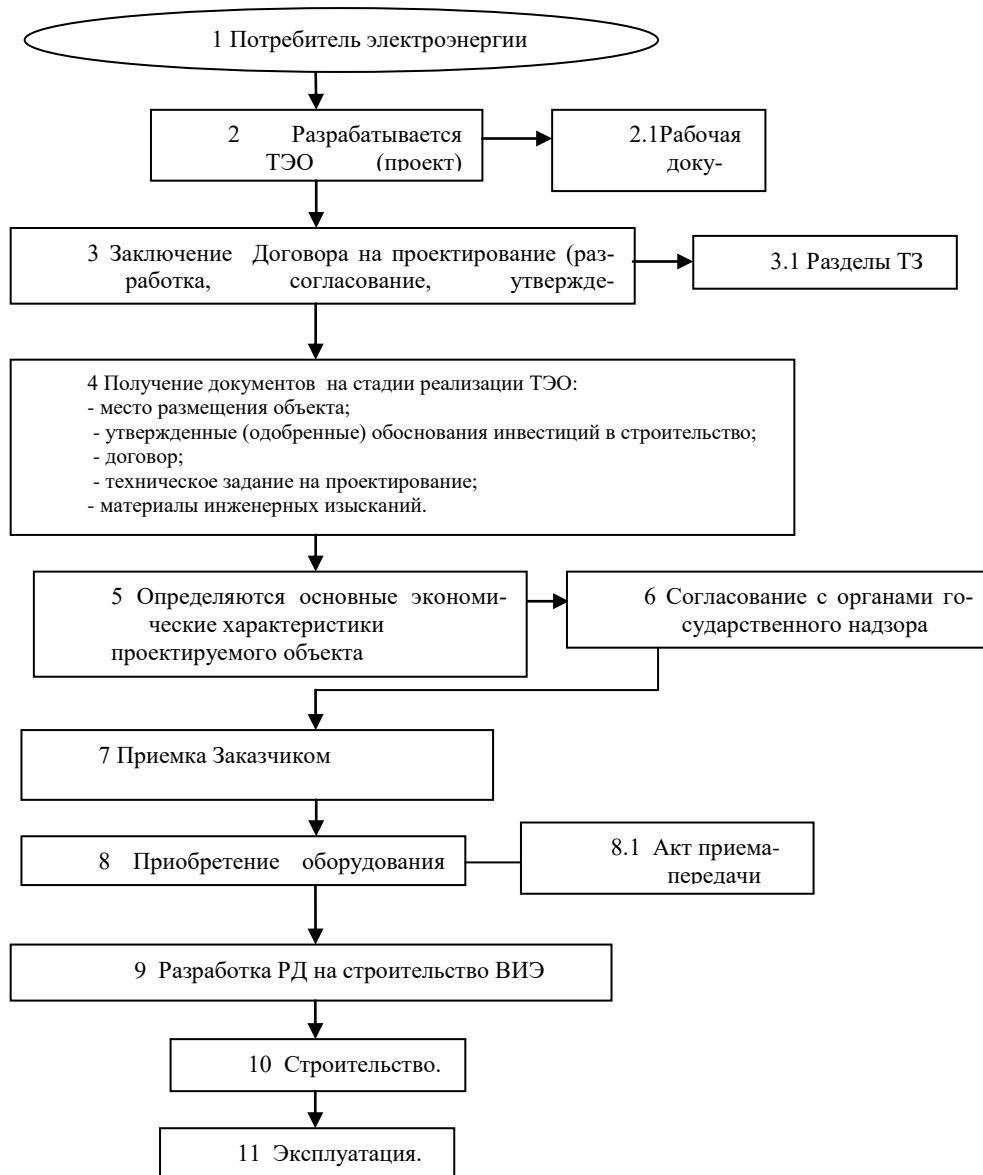


Рис. 1. Алгоритм установки и подключения ВИЭ к автономному потребителю

Библиографический список

1. **Рогозина, Д. А.** Проблемы и перспективы развития ветроэнергетических установок в России / Д. А. Рогозина [и др.]. // Молодой ученый. — 2016. — №22.3. — С. 40-43. [Электронный ресурс]. URL <https://moluch.ru/archive/126/35099/>
2. Ассоциация «Некоммерческое партнерство Совет рынка по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью». Май 2017 [Электронный ресурс] URL: https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf
3. **Кечкин, А. Ю.** К вопросу об определении «виртуальной электростанции» / А. Ю. Кечкин, Н. И. Эрдили // ЭНЕРГИЯ-2018: тринадцатая междунар. научно-технич. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых г. Иваново, 3-5 апреля 2018 г. – Иваново, 2018.
4. Новые реалии розничных рынков: распределенная генерация, виртуальные электро-

станции, интеллектуальные системы. Заместитель генерального директора РЭА И.С. Кожуховский . 6 декабря 2013 город Москва. [Электронный ресурс] URL: http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/01/Novie_realii_roznichnih_rinkov.pdf

УДК 621.3

Е.В. Крюков, А.В. Иванов**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВИРТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведено описание структуры разрабатываемого имитационного комплекса виртуальной электростанции (ВиЭС), включающего в себя модели элементов ВиЭС (генерирующие установки, накопители электроэнергии и потребители); описание разработанной имитационной модели ветроэнергетической установки. Получен график зависимости вырабатываемой генератором мощности от скорости ветра.

Description of the structure of a simulation complex of virtual power plant (VPP), now being developed, is given in the article. The complex includes elements' models of VPP (generating units, power storage units and consumers). There is narrative of a designed simulation model of wind power generator and wind power curve.

Ключевые слова: виртуальная электростанция, система управления, распределенная энергетика, возобновляемые источники энергии, умные сети, ветрогенерирующая установка, газопоршневая установка.

Key words: virtual power plant, control system, distributed energy, renewable sources of energy, smart grid, wind power generator, gas-piston engine.

Одним из магистральных направлений развития электроэнергетики России, в соответствии с Энергетической стратегией на период до 2035 г. [1], является развитие «умных сетей» (Smart Grids), интеллектуальной распределенной энергетике, потребительских сервисов и «энергетического интернета» в рамках реализации «дорожной карты» «Энерджинет» Национальной технологической инициативы. Инновационной энергетической концепцией, обеспечивающей решение ряда современных энергетических проблем, служит «виртуальная электростанция».

Виртуальная электростанция выступает в роли агрегатора установок распределенной генерации посредством общей системы управления их режимами. Данное объединение обеспечивает максимальную оптимизацию и эффективность работы системы электроснабжения, учет накопителей энергии для компенсации неравномерности режимов работы распределенных возобновляемых источников энергии, а также стимулирование потребителей к активному участию в формировании розничного рынка электроэнергии (управление спросом посредством участия в регулировании графика нагрузки).

Важная часть виртуальной электростанции – система управления, основная задача которой в управлении перераспределением потоков мощности между генерирующими установками и накопителями, с одной стороны, и потреби-

телями, с другой, тем самым обеспечивая баланс мощностей в системе. Помимо технических параметров, система управления учитывает прогнозируемые данные о динамике цен на рынке и погодных условий.

Структурная схема рассматриваемой системы электроснабжения представлена на рис. 1.

Система электроснабжения состоит из двух сегментов. В первый сегмент входит возобновляемый источник энергии (ветрогенератор) и накопитель электрической энергии (аккумуляторная батарея), во второй – маневренный источник энергии – газопоршневая установка (ГПУ).

В нормальном режиме ветрогенератор и ГПУ работают на свою группу потребителей. При нарушении равенства между генерацией и потреблением в каком-либо из сегментов система управления начинает поиск его оптимального устранения за счет перераспределения потоков мощности.

С целью исследования и анализа различных алгоритмов управления агрегированными источниками распределенной энергетики возникает первоочередная необходимость в создании имитационной модели каждого элемента системы: ветрогенерирующая установка, ГПУ и нагрузка (потребитель электроэнергии). При этом разработанные имитационные модели должны иметь возможность аппаратной реализации, то есть реализации логики и алгоритмов работы на физических устройствах. Учитывая это, разработка имитационной модели осуществлена в программном комплексе LabVIEW [2].

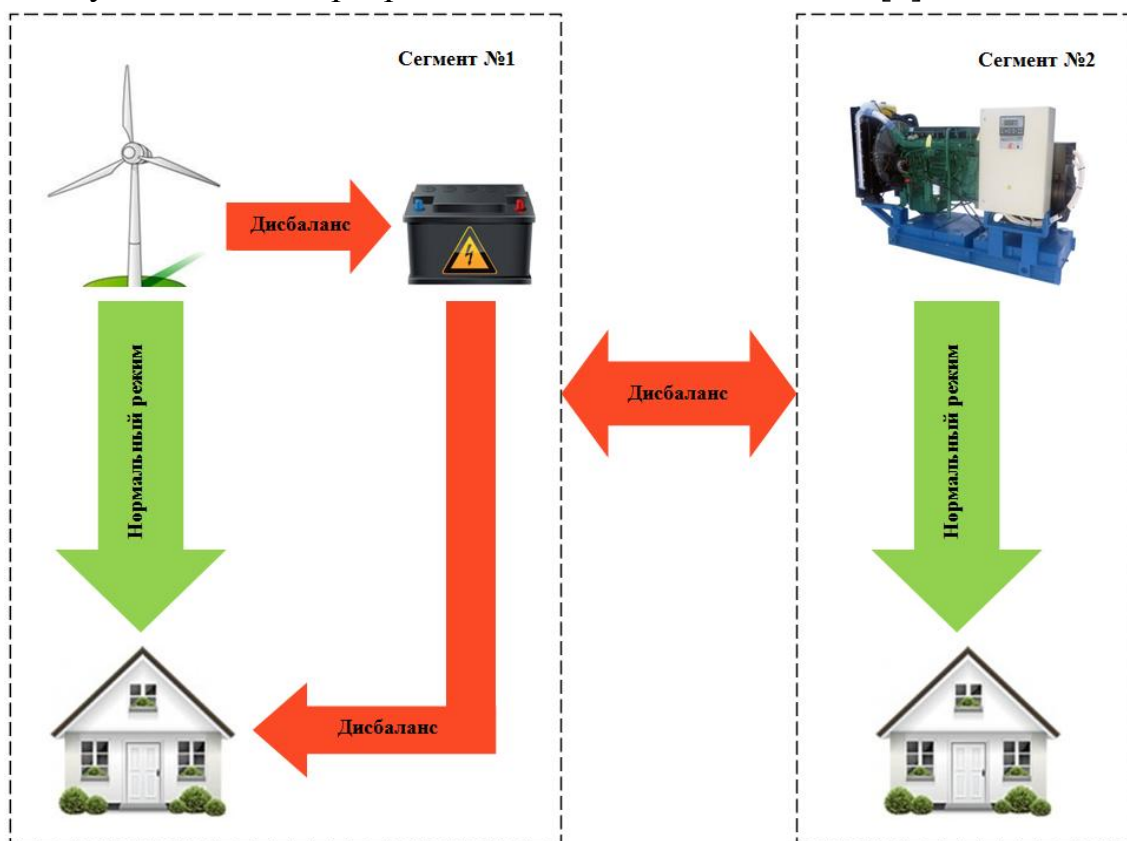


Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы электроснабжения

В статье представлены результаты разработки имитационной модели ветроэнергетической установки (ВЭУ), предназначенной для использования при разработке системы управления виртуальной электростанцией [3]. Ввиду ограниченного количества информации о паспортных данных ВЭУ в основу моделирования были положены уравнения, выведенные по эмпирическим данным [4 - 6].

Разработан алгоритм функционирования имитационной модели ВЭУ, блок-схема которого представлена на рис. 2. Алгоритм описывает четыре режима работы ВЭУ.

Модель в LabVIEW состоит из двух компонентов: лицевая панель и блок-диаграмма. Лицевая панель – это интерфейс, с помощью которого возможен ввод пользовательских данных, а также вывод результатов в понятном для пользователя виде. Блок - диаграмма отражает алгоритмы, имитирующие работу моделируемого объекта [7]. Внешний вид лицевой панели программно зависим, то есть изменяется в зависимости от текущих входных данных программы. Так, при мощности на валу ветродвигателя, недостаточной для выработки электроэнергии, возможность ввода величины нагрузки скрыта от пользователя.

На рис. 3 в качестве примера показан внешний вид лицевой панели при скорости ветра от 11 до 25 м/с.

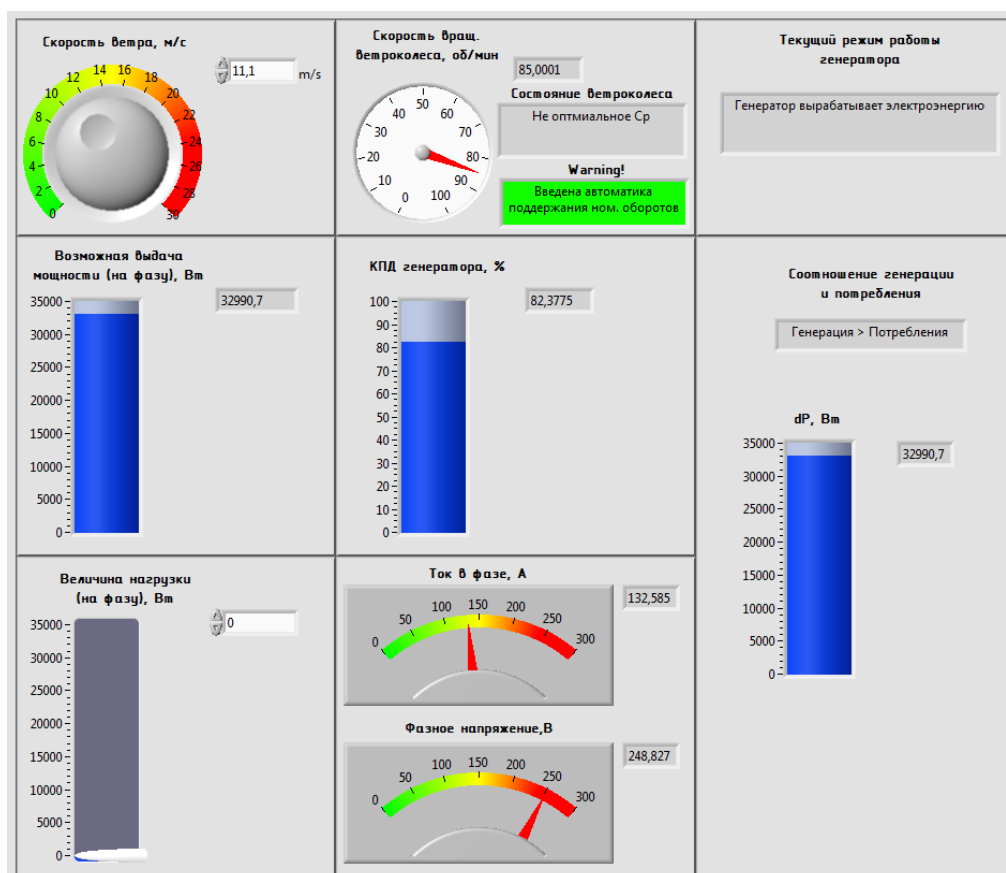


Рис. 3. Внешний вид лицевой панели виртуального прибора модели ветрогенератора при скорости ветра от 11 до 25 м/с

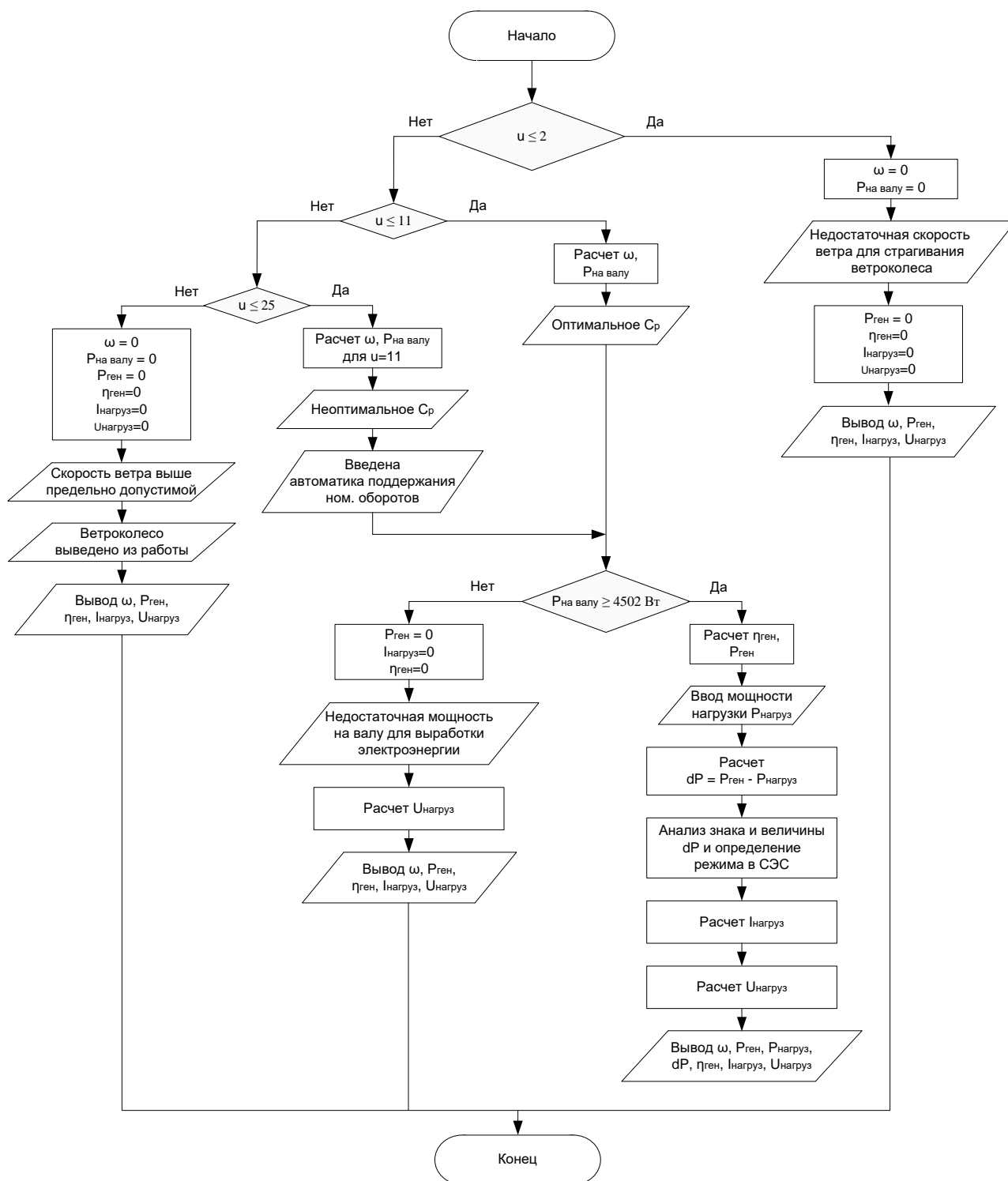


Рис. 2. Блок - схема алгоритма функционирования имитационной модели ВЭУ:

u – скорость ветра, м/с; ω – скорость вращения ветроколеса, об/мин; $P_{\text{на валу}}$ – мощность на валу ветродвигателя, Вт; $P_{\text{ген}}$ – мощность, выдаваемая генератором, Вт; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора, %; $I_{\text{нагруз}}$ – ток нагрузки, А; $U_{\text{нагруз}}$ – фазное напряжение на нагрузке, В; dP – разность между генерируемой мощностью и мощностью нагрузки, Вт

На рис. 4 представлен полученный с помощью модели график зависимости выдаваемой генератором мощности от скорости ветра. Сравнение полученных зависимостей параметров работы ВЭУ от скорости ветра с аналитическими характеристиками позволяет сделать вывод о корректности ее работы.

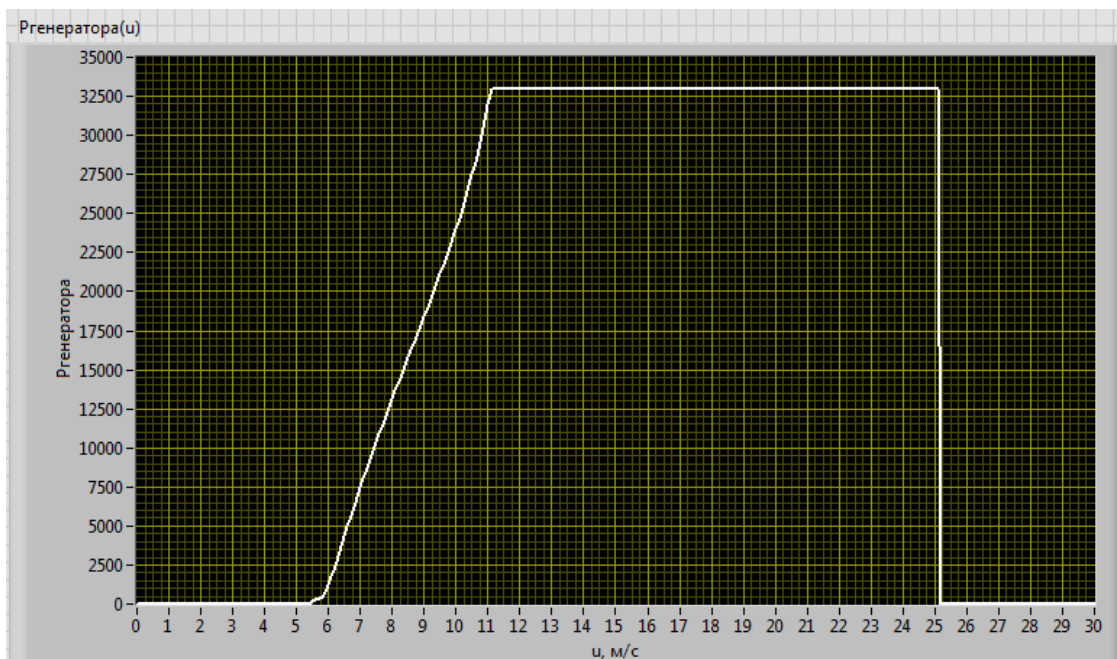


Рис. 4. График зависимости выдаваемой генератором мощности от скорости ветра

Работу ВЭУ можно разделить на четыре зоны, как показано на рис. 5. В зоне 1 $P_G = 0$ по причине недостаточной мощности, развиваемой валом ветродвигателя. Зона 2 соответствует рабочему режиму ($P_G > 0$) с оптимальным коэффициентом использования ветра (C_p), в отличие от зоны 3, где ВЭУ работает с введенной в работу автоматикой поддержания номинальных оборотов. В зоне 4 ветроколесо выведено из работы, так как скорость ветра выше предельно допустимой.

Таким образом, представленная имитационная модель ВЭУ позволила определить условия, обеспечивающие оптимальные параметры режима работы установки. Разработанная модель в дальнейшем будет использована при разработке системы управления виртуальной электростанцией и отработке алгоритмов управления.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственное задание №13.2078.2017/4.6).

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года : Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. – [Электронный ресурс] URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026/>
2. **Трэвис, Дж.** Labview для всех / Дж. Трэвис, Дж. Кринг. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
3. **Кирпичникова, И. М.** Преобразование энергии в ветроэнергетических установках / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 93–97.
4. **Балагуров, В. А.** Электрические машины с постоянными магнитами. / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 220 с.
5. **Кривцов, В. С.** Ветроэлектрогенераторы: учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2003. – 400 с.
6. **Легошин, Д.В.** Экспериментальное определение характеристик синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов / Д.В. Легошин, С. В. Губин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – 2010. – Вып. 45. – С. 299 – 302.
7. **Суранов, А.Я.** Labview 8.20: справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

УДК 62-52-83:656.56

А.Б. Васенин, Г.М. Мирясов

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ НА УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ТЭК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены возможности использования комплекса разнородных возобновляемых источников электроэнергии для надежного питания автономных потребителей промышленных объектов топливно-энергетического комплекса. На примере объектов газопроводов обоснована целесообразность применения гибридных систем. Представлены результаты оптимизации электроэнергетических характеристик ветроэнергетических установок для эффективного съема и преобразования ветрового потока станций. Предложены методики и алгоритмы автономного электроснабжения.

The article considers the possibilities of using a complex of diverse renewable energy sources for reliable feeding of autonomous consumers of industrial facilities of the fuel and energy complex. On the example of gas pipeline facilities, the expediency of using hybrid systems is justified. The results of optimization of electric power characteristics of wind power plants for effective removal and transformation of the wind flow of stations are presented. Methods and algorithms of autonomous power supply are offered.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, вдольтрассовые потребители, автономное электроснабжение, ветроэнергетическая установка, оптимизация.

Key words: renewable energy sources, along-route consumers, autonomous power supply, wind power installation, optimization.

Развитие отечественного топливно-энергетического комплекса (ТЭК) стимулируют расширение масштабов исследований, направленных на экономию традиционных углеводородных источников электроэнергии (ТИЭ) [1, 2] и поиск новых стратегий энергоэффективного обеспечения потребителей с привлечением возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3 - 5].

Особенность географического положения Российской Федерации и наличие больших территорий с низкой плотностью населения 20 млн чел. (около $\frac{2}{3}$), а также огромная сеть газонефтепроводов и газонефтехранилищ обуславливает необходимость автономного энергообеспечения данных районов. В качестве автономных источников электроэнергии (АИЭ) здесь использовались дизельные электростанции и котельные агрегаты на угле, мазуте или другом топливе. Однако эти средства энергообеспечения становятся сегодня все более затратными с тарифами на электроэнергию до 100 руб./кВт·ч и неэкологичными [6, 7]. Вместе с тем, в отечественной и мировой электроэнергетике уже накоплен большой опыт создания ВИЭ как альтернатива или в сочетании с углеводород-

ными. Суммарная мощность ВЭУ в мире достигла 194 ГВт с КПД до 0,593 и выработкой более 430 ТВт·ч в 2018 г.

Среди всего многообразия АИЭ и ВИЭ в условиях географических и климатических особенностей территории Российской Федерации наибольшее распространение получили разработки ВЭУ, ветряных ферм (станций) и ветродизельных энергоустановок (ВДЭУ). Это связано с известными преимуществами их перед другими типами ВИЭ: низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы, высокие показатели КПД, надёжности и наработки на отказ, отсутствие расхода углеводородного топлива и экологически вредных выбросов и шума. Наконец, средства автоматизированного управления и регулирования [8, 9] позволяют обеспечить оптимальные режимы генерирования, энергосбережения, мониторинга и устойчивости работы систем электроснабжения (СЭС) для удаленных потребителей.

Анализ требований к СЭС вдольтрассовых потребителей

Основными вдольтрассовыми потребителями электроэнергии являются: установки электрохимической защиты, контролируемые пункты линейной телемеханики, оборудование радиорелейной связи, газоизмерительные станции, узлы запуска очистных устройств, газораспределительные станции и др. Суммарная мощность этих потребителей достигает по разным газотранспортным предприятиям от 0,25 до 9 МВт, а протяженность вдольтрассовых ЛЭП от 150 – 4800 км. Подобный разброс параметров предполагает при проектировании СЭС каждого участка индивидуальный адаптированный подход к формированию источников и схемы АИЭ.

Структурообразование современных СЭС линейными потребителями МГ определяется их индивидуальными особенностями, среди которых главными являются: значительная протяженность газопроводов и дифференциация расположения объектов электропитания по трассе; удаленность их от существующих внешних энергоисточников и централизованных электросетей; малые электрические нагрузки линейных потребителей (2 – 40 кВт).

Надежность СЭС линейных потребителей – главный фактор, обеспечивающий стабильное и безаварийное состояние газотранспортных систем. В районе размещения площадок ВТП, где отсутствуют ВЛ 6(10) кВ, применяются полностью автономные системы, основным источником электроснабжения является парогенераторная установка ОРМАТ, резервным источником может выступать ДЭС, ВТЭ и др. (рис. 1).

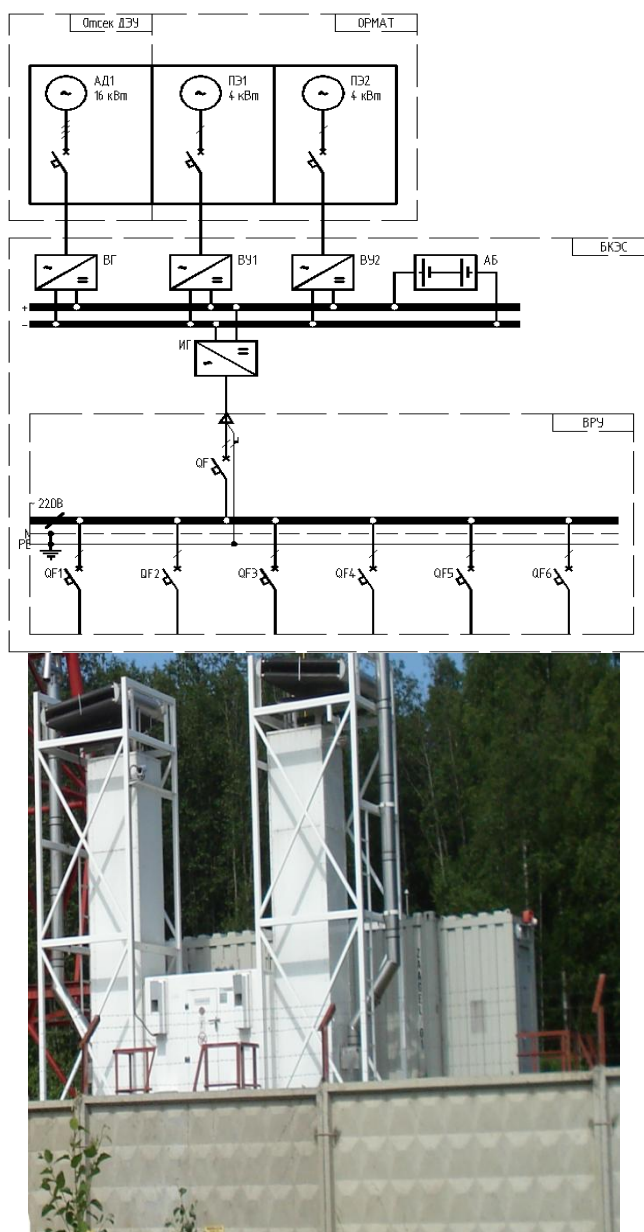


Рис. 1. Схема и фото источников электроснабжения с АИЭ

Независимое (автономное) электроснабжение с питанием от АИЭ на основе топливного газа требует существенно меньше капитальных затрат, но обладает зависимостью от наличия топливного газа и требуется мониторинг состояния работы [10 - 12].

Оптимизация ВЭУ для СЭС автономных потребителей

Исходя из стохастического характера амплитудно-частотных характеристик ветрового потока при законе распределения Вейбулла - Гудрича скоростей ветра (рис. 2) на объемы и качество выработки электроэнергии ВЭУ влияет обоснованный выбор параметров синхронного генератора (СГ) ($P_{уст}$, ω_0) и работа ветротурбины в оптимальных точках скоростей ветра.

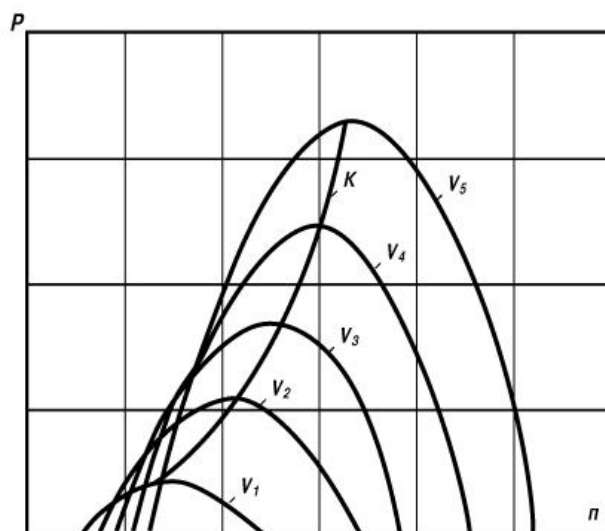


Рис. 2. Мощностные характеристики ветротурбин:

P – мощность выходная, о.е.; n – частота вращения вала, 1000 об/мин; V_1 - V_5 – линейные скорости ветров; K – линия максимума съема

Так, в условиях 115 метеостанций РФ расчет основных энергетических характеристик ветра (среднегодовой скорости ветра V_0 , удельной валовой мощности $N_{уд}$, коэффициента вариации C_v) показал, что диапазон их вариаций достаточно широк и составляет $V_0 = 1,39 \div 7,48$ м/с; $N_{уд} = 0,01 \div 0,565$ кВт/м². При этом ВЭУ с переменной частотой вращения ветроколеса имеют потенциальную возможность преобразовывать энергию ветра в электрическую с большим коэффициентом использования энергии ветра даже при низких скоростях.

Для получения режимов максимальной энергоэффективности работы ВЭУ в локальных СЭС в условиях случайного характера ветрового потока и потребления необходимо обеспечивать работу ВЭУ в оптимальных областях.

Наибольшее влияние на процесс выработки электроэнергии ВЭУ оказывают значения стохастических параметров, имеющих метеорологическую и технологическую природу:

- величина линейной скорости ветра V , м/с;
- плотность воздуха в ветровом потоке ρ , кг/м³, зависящая от атмосферного давления p_a , МПа, температуры T_b , °К, воздуха по уравнению Клапейрона;
- энергопотребление $W_{потр}$, кВт·ч, электро- и тепловая мощности G_m .

Задание управляющего воздействия на ПЧ или мультипликатор должно изменяться по аналитическим регрессионным алгоритмам вида

$$U_3 = f(V, p_a, T_b, G_m). \quad (1)$$

Для реализации функции (1) необходимо использовать базу метеоданных для региона предполагаемого размещения ВЭУ и статистически обработать их

методами планирования эксперимента. Математические модели алгоритма управления ПЧ-СГ ВЭУ для работы в оптимальной области получены на основе информации о параметрах работы и экспериментальных данных. Для этого в (1) найдены параметры a_j линеаризованной модели вида

$$U_3 = a_1 V + a_2 p_a + a_3 T_e + a_4 G_m + \zeta, \quad (2)$$

где ζ – матрица помех (неучтенных факторов).

В результате расчетов по модели (2) для ВЭУ типа «Бриз-5000», расположенных на побережье Ладожского озера, получено четырехфакторное уравнение линеаризованной регрессии

$$U_3 = 12,214 \cdot V + 0,219 \cdot p_a + 0,92 \cdot T_e - 0,022 \cdot G_m + 9,602, \quad (3)$$

которое является искомым алгоритмом инвариантного задания и управления электромеханической системой ВЭУ. Как видно из выражения (3), наибольшее влияние имеют факторы V (12,214) и T_e (0,92). Аналогично найдены линеаризованные уравнения для двухфакторной модели, учитывающей влияние только скорости ветра и температуры воздуха T_e по сухому термометру:

$$U_{32} = 3,899 \cdot V + 0,384 \cdot T_e + 30,988. \quad (4)$$

Ковариационный анализ полученных зависимостей (3) и (4) показал, что данные регрессионные алгоритмы в полной мере отслеживают текущие входные возмущения и корректируют максимум выработки электроэнергии ВЭУ. Автоматическая стабилизация выходного напряжения ВЭУ обеспечивается в системе инвариантного регулирования СГ-ПЧ.

Выводы

1. Анализ состояния СЭС ТЭК показал, что надежное и энергоэффективное энергоснабжение автономных объектов РФ актуально, а энергоемкость ТЭК РФ в 2 - 4 раза выше, чем в США и Германии.

2. Работа ВЭУ с СГ-ПЧ на оптимальных режимах обеспечивается новыми законами управления с ростом выработки электроэнергии до 30 - 50%.

3. Проверка адекватности алгоритмов ВЭУ проведена для семи режимов на экспериментальной установке с СГ 254-33УХЛ2-1кВт и ПЧ 6SE6420-2UD25-5CA0 и показала экономическую эффективность новых систем.

Библиографический список

1. **Пужайло, А. Ф.** Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А. Ф. Пужайло [и др.]. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.
2. **Краснов, Д. В.** Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности // Газовая промышленность. – 2014. – № 6 (707). – С. 86 - 89.
3. **Серебряков, А.В.** Интеллектуальные ветроэнергетические установки для автономных систем электроснабжения / А. В. Серебряков. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – 135 с.
4. **Васенин, А. Б.** Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки / А. Б. Васенин, А. В. Серебряков // Приводная техника. – 2012. – №4. – С. 2 - 11.
5. **Степанов, С. Е.** Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций / С. Е. Степанов, А. С. Плехов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29 - 31.
6. **Аникин, Д. А.** Проектирование систем управления ЭГПА / Д. А. Аникин, И. И. Рубцова, Н. В. Киянов // Газовая промышленность. – 2009. – №2. – С. 44 - 47.
7. **Крюков, О. В.** Регулирование производительности ГПА с помощью преобразователей частоты // Компрессорная техника и пневматика. 2013, №3. С.21-24.
8. **Крюков, О. В.** Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39 - 43.
9. **Степанов, С. Е.** Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа / С. Е. Степанов, В. Г. Титов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – №2. – С. 5 - 10.
10. **Бабичев, С. А.** Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА / С. А. Бабичев, В. Г. Титов // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24 - 31.

УДК 621.311

Е.И. Грачева, О.В. Наумов**СТРУКТУРНО – БАЛАНСОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

Казанский государственный энергетический университет

Предлагается структурно-балансовая модель промышленного предприятия, составленная на основе электрического баланса в рабочей форме. Производственный процесс предприятия представляется в виде последовательной цепи технологических процессов, что позволяет оценить суммарное потребление электроэнергии по отдельным статьям расхода. Предлагаемый подход служит для определения и использования дополнительных резервов и обеспечения рационального электропотребления.

The presented article proposes a structural and balance model of an industrial enterprise, compiled on the basis of an electric balance in a working form. In this case, the production process of the enterprise is represented in the form of a sequential chain of technological processes, which makes it possible to estimate the total consumption of electricity by individual items of expenditure. The proposed approach serves to identify and use additional reserves and ensure rational power consumption.

Ключевые слова: электроснабжение, модель, электросеть, напряжение, низковольтные.

Key words: electricity supply, model, electric grid, voltage, low voltage.

В современных условиях мирового экономического кризиса вопросы энергосбережения в низковольтных цеховых сетях приобретают первостепенное значение. Одной из основных задач современной электроэнергетики России, наряду с увеличением абсолютных объемов производства электроэнергии, является усиление контроля за ее рациональным использованием. Экономия электроэнергии и снижение расхода на ее передачу по электрическим сетям имеют большое значение для всей энергетики страны. В нынешних условиях России при возникновении мелких и средних производств и разукрупнении промышленных гигантов проблема экономии электроэнергии остается весьма актуальной [1, 2]. Задача отыскания резервов экономии на основе анализа расхода электроэнергии становится особенно важной, тем более что резервы экономии значительны. Непрерывный рост потребления электроэнергии стимулирует темпы роста электрических комплексов.

Решение задачи повышения эффективности расходуемой на промышленном предприятии электроэнергии производится с использованием данных о реальном потреблении и о величине потерь электроэнергии в отдельных производственных подразделениях и цехах. Эта информация является первоосновой

при любом анализе электропотребления и определяет характер мероприятий, проводимых с целью снижения уровня потерь электроэнергии внутри промышленного предприятия.

В повышении эффективности промышленного производства значительная роль принадлежит разработке оптимальных энергобалансов промышленных предприятий. Энергобаланс – основной метод планирования и анализа энергоиспользования предприятия. Общие требования к разработке и анализу энергобалансов устанавливает ГОСТ 27322-87 [3]. Отраслевая методика составления энергетических балансов промышленных предприятий, разработанная научно-исследовательской лабораторией промышленно-экономических исследований [4], в основе своей была использована при составлении баланса на ряде промышленных предприятий.

Детальное обследование энергетического хозяйства ряда предприятий и изучение производственно-технологических процессов показало, что существующая методика составления энергобаланса не учитывает особенности промышленного производства.

При разработке энергобаланса в синтетической форме в первую очередь заполняется статья расхода по основному энергоемкому производству с выделением подстатей расходов на технологические процессы и силовые, далее статьи расходов на хозяйственно-бытовые и собственные нужды (освещение, отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение), вспомогательное производство.

Для решения вопросов рационального расхода энергии в технологических агрегатах цехов в графе «технологические процессы» необходимо предусмотреть группировку агрегатов и установок по целевому признаку, т.е. по направлению использования энергии. Статьи расходов вспомогательных производств целесообразно группировать по территориальному и целевому признакам без выделения групп электроприемников, участвующих в производственном процессе.

Для более эффективного использования электроэнергии не только на основные технологические процессы, но и на вспомогательные нужды самостоятельными балансовыми статьями должны быть статьи по расходу электроэнергии компрессорными и насосными станциями, а также котельными. Учет обще-заводских потребителей и вспомогательных цехов на предприятиях, выпускающих несколько видов продукции, самостоятельными статьями в балансе расхода электроэнергии позволит унифицировать нормирование наработку сжатого воздуха, ацетилена, кислорода, подачу воды и т.д., не распределять расход электроэнергии между продукцией выпускающих цехов, обеспечить учет и контроль за выполнением норм расхода энергии каждым цехом в отдельности по приборам учета.

Важным моментом при составлении электробаланса в синтетической форме является расчет отдельных элементов баланса, которые не могут быть точно определены на основе показаний приборов или испытаний (например, потери электроэнергии в цеховой сети, цеховых трансформаторах). Поэтому эти статьи должны определяться расчетным путем.

В случае, если предприятие, кроме основной продукции, выпускает товары народного потребления, то расход электроэнергии на их производство включается в электробаланс отдельно.

Таким образом, электробаланс, составленный в производственно-территориальном разрезе с выделением расхода электроэнергии по цехам и установкам, сгруппированным по целевому признаку, позволяет провести более эффективно анализ целевого использования электроэнергии, установить энергоемкие производства, разработать энергосберегающие мероприятия общезаводского характера для наиболее точного энергетического обследования.

Повышение уровня рационального использования электроэнергии на промышленных предприятиях является одной из важнейших задач современности. Это определяется не только ростом стоимости 1 кВт·ч электроэнергии, но и тем, что объем выработанной электроэнергии уменьшается в связи с недостаточным поступлением количества топлива на тепловые электрические станции. Анализ режимов электропотребления промышленных предприятий показывает, что на некоторых из них, даже с уменьшением выпускаемой продукции, количество расходуемой электроэнергии не уменьшается.

В этих условиях необходим системный подход к задаче исследования электропотребления производственного процесса и определения внутренней экономии. Первому этапу анализа производственных систем соответствует составление и исследование электрических балансов в синтетической и аналитической формах, целью которого является оценка фактического состояния электропотребления на предприятии и выявление причин, из-за которых режим электропотребления не зависит от количества и качества выпускаемой продукции.

Для анализа электробаланса желательно представить весь производственный процесс предприятия в виде последовательной цепи технологических процессов. Ценность такого схематического изображения производственного процесса состоит в количественном представлении потребления электроэнергии по отдельным технологическим процессам. Расчет потребления электроэнергии по предприятию в целом производят суммированием потребления по отдельным статьям расхода. Потребление электроэнергии по отдельным статьям расхода определяется суммированием потребления по отдельным электроприемникам и электроустановкам [5].

Одним из путей снижения электропотребления является управление режимами работы осветительных установок, применение осветительных установок новейших конструкций. Так, замена ламп накаливания на *LED*-светильники и люминесцентные лампы (без снижения уровня освещенности) дает экономию электроэнергии на освещение до 20%.

Анализ режима работы вентиляционных установок показал, что большинство из них имеют недопустимые отклонения от номинального режима работы. Замена вентиляционных установок старых типов с низким коэффициентом полезного действия вентиляторами нового поколения с повышенным КПД, применение частотно-регулируемого привода позволяет снизить расход элек-

троэнергии на системы вентиляции до 60%. Кроме того, на экономичность работы вентиляционных систем значительно влияет конфигурация вентиляционной сети. Более чем на 10% удастся снизить потребление электроэнергии на вентиляцию благодаря использованию фасонных элементов сети оптимальной формы, особенно на входе и выходе вентилятора.

Перечисленные мероприятия не являются единственно возможными при решении задач по экономии электроэнергии, а служат лишь достаточно наглядным примером того, что на каждом действующем предприятии имеется возможность отыскать и использовать дополнительные резервы для обеспечения рационального использования и эксплуатации электрического хозяйства.

Библиографический список

1. **Федоров, О. В.** Электротехнические комплексы и системы предприятий как объекты энергосбережения / О. В. Федоров, Н. В. Голубцов // Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы: Материалы Междунар. науч.-практич. конф. - Ульяновск: УГТУ, 2012. – С. 222 - 226.
2. **Федоров, О. В.** Инновационная деятельность: учеб.: для студентов высших учебных / О.В. Федоров, И.И. Гребенюк, В.П. Романчук. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 514 с.
3. ГОСТ 27322-87. Энергобаланс промышленного предприятия. Общие положения. – Введ. 01.07.88. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 15 с.
4. Отраслевая методика по разработке и анализу топливо - энергетических балансов предприятий медицинской промышленности. – М.: ЦБ АСУ Медпром, 1982. – 162 с.
5. **Грачева, Е. И.** Особенности компоновки и технические характеристики оборудования систем внутрицехового электроснабжения / Е. И. Грачева, А. В. Шагидуллин, А. В. Рыбакова // Электрика. – 2013. – №5. – С. 25 - 28.

УДК 621.311.1

Е.И. Грачева, А.Н. Алимова**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЦЕХОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Казанский государственный энергетический университет

Приведены расчеты зависимости коэффициента реактивной мощности от коэффициента загрузки трансформаторов марок ТМ (трансформатор масляный) и ТСЗ (трансформатор сухой защищенный), а также технико-экономическое доказательство того, что использование двух силовых трансформаторов меньшей мощности гораздо выгоднее применения одного более мощного.

The article presents calculations of the dependence of the reactive power factor on the loading factor of transformers OT`s (oil transformer) and DPT`s (dry protected transformer), as well as technical and economic proof that use of two transformers of lower power is much more profitable than application of one more powerful transformers.

Ключевые слова: коэффициент загрузки, трансформаторы, потери мощности, реактивная мощность.

Key word: loading factor, transformer, power losses. reactive power.

На данный момент в России характер потребления электроэнергии (ЭЭ) заметно меняется. Это связано с ростом мощности нелинейных потребителей, а также ускоряющимся темпом потребления реактивной мощности по отношению к активной из-за уменьшения загрузки силовых трансформаторов. Это характерная черта современной электроэнергетики, негативно влияющей на качество и потери ЭЭ.

Силовые трансформаторы - крупные потребители реактивной мощности на промышленных предприятиях [1, 2]. Их доля составляет около 30% всей реактивной мощности, потребляемой в промышленных электрических сетях.

Потребляемая реактивная мощность складывается из двух составляющих: реактивной мощности намагничивания Q_0 и реактивной мощности полей рассеяния Q_P и определяется по выражению (1) [3]

$$Q = Q_0 + Q_P = S_{H.T.} \cdot \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} k_3^2 \right), \quad (1)$$

где Q_0 - мощность намагничивания; Q_P - мощность рассеяния; $S_{(H.T.)}$ - номинальная мощность трансформатора; I_{xx} - ток холостого хода трансформатора;

U_k - напряжение короткого замыкания трансформатора; k_3 - коэффициент загрузки трансформатора.

$$k_3 = \frac{S_{НАГР}}{S_{Н.Т.}}, \quad (2)$$

где $S_{НАГР}$ - мощность нагрузки.

С помощью математических преобразований (3) и (4) найдем коэффициент реактивной мощности $tg\varphi$:

$$S_{НАГР} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad P = \sqrt{S_{НАГР}^2 - Q^2} \quad S_{НАГР} = S_{Н.Т.} \cdot k_3, \quad (3)$$

$$tg\varphi = \frac{P}{Q} = \frac{S_{Н.Т.} \cdot \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{НАГР}^2 - Q^2}} = \frac{S_{Н.Т.} \cdot \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_3^2 \right)}{\sqrt{S_{Н.Т.}^2 \cdot \left(k_3^2 - \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_3^2 \right)^2 \right)}} \quad (4)$$

Из (4) следует, что коэффициент реактивной мощности $tg\varphi$ определяется по выражению

$$tg\varphi = \frac{\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_3^2}{\sqrt{k_3^2 - \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_3^2 \right)^2}} \quad (5)$$

Потребление реактивной мощности силовыми трансформаторами зависит от загрузки. Для оценки влияния нагрузки трансформаторов на потребление реактивной мощности по выражению (2) выведены значения коэффициента реактивной мощности для силовых трансформаторов типа ТМ и ТСЗ нормальной мощностью 25 - 2500 кВ*А при различных значениях коэффициента загрузки. Исходные данные берутся из каталога.

По результатам расчета для каждого из трансформаторов построены графики зависимости (рис.1).

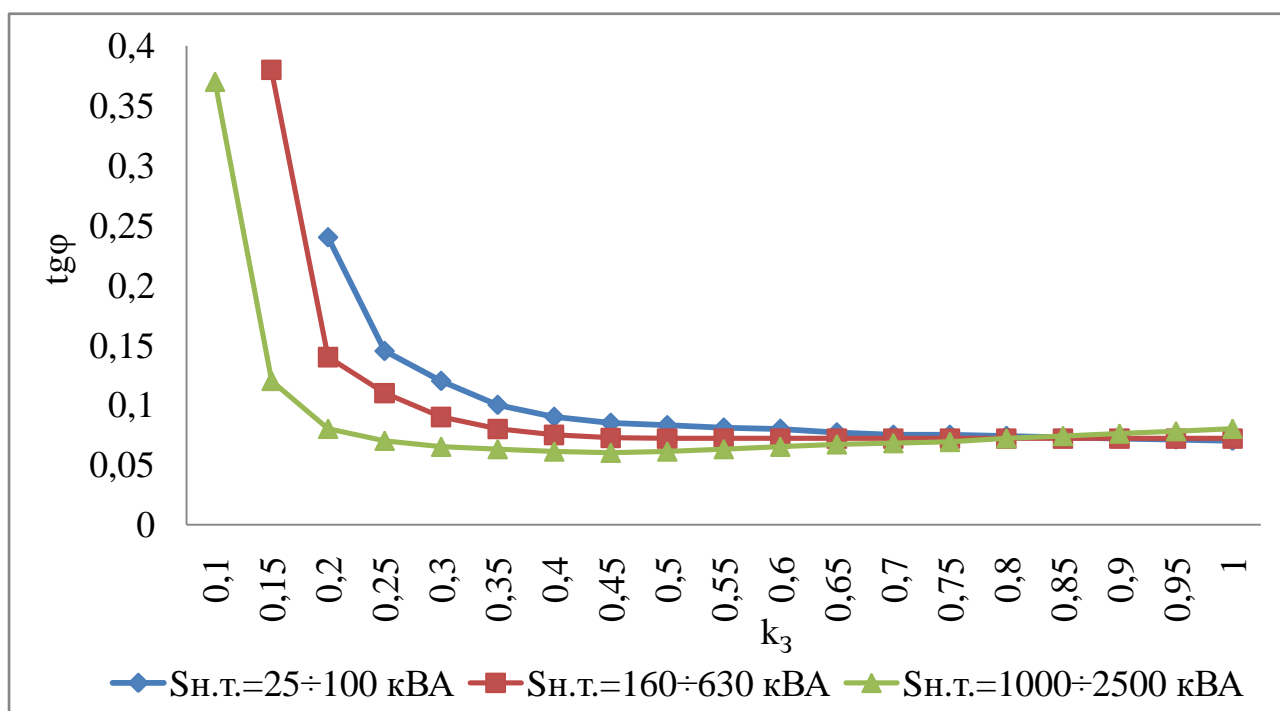


Рис. 1. Зависимость $\text{tg}\varphi$ от коэффициента загрузки k_3 для трансформаторов ТМ и ТСЗ

Характер изменения графика имеет примерно одинаковый вид для отдельных групп силовых трансформаторов в определенных диапазонах их номинальных мощностей. Из графиков следует, что коэффициент реактивной мощности увеличивается при снижении коэффициента загрузки. Большую часть реактивной мощности, потребляемой силовыми трансформаторами при малой загрузке, составляет реактивная мощность намагничивания [5].

Графики зависимости $\text{tg}\varphi = f(k_3)$ показывает, что с уменьшением номинальной мощности увеличивается потребляемая реактивная мощность.

В настоящее время особенно важным является решение проблемы малой загрузки электроснабжения промышленных предприятий [7, 8]. Уменьшение k_3 ведет к росту потребления реактивной мощности, поэтому нужно обеспечить режимы работы трансформаторов с оптимальной загрузкой для снижения потребляемой реактивной мощности и потерь холостого хода [9, 10]. Для этого на предприятиях рекомендуется замена малонагруженных трансформаторов на трансформаторы меньшей мощности, переключение нагрузки трансформаторов с низким k_3 на другие трансформаторы и отключение трансформаторов на время работы на холостом ходу. Всё это будет улучшать технико-экономические показатели работы систем электроснабжения [10, 11].

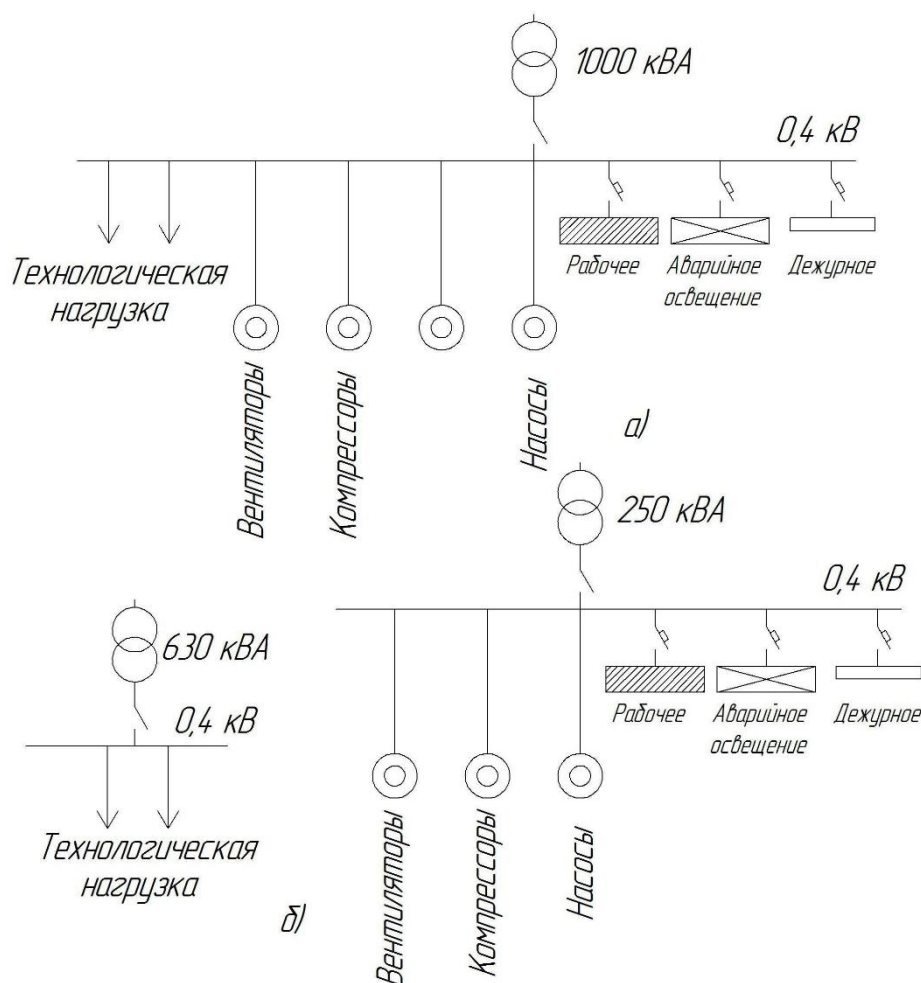


Рис. 2. Схемы электроснабжения промышленных потребителей:

a – совместное питание от одного трансформатора с $S_{Н.Т.} = 1000$ кВА; *б* – раздельное питание нагрузки от двух трансформаторов с $S_{Н.Т.1} = 630$ кВА и $S_{Н.Т.2} = 250$ кВА

По виду зависимостей (рис. 1) можно сделать вывод, что использование трансформаторов при малом коэффициенте загрузки нецелесообразно. Оптимальное значение k_3 для трансформатора ТМ и ТСЗ $k_3 > 0,4$ при $S_{Н.Т.} = 25 \div 100$ кВА, $k_3 > 0,35$ при $S_{Н.Т.} = 160 \div 630$ кВА и $k_3 > 0,3$ при $S_{Н.Т.} = 1000 \div 2500$ кВА, где отношение реактивной мощности трансформаторов к его активной мощности минимально.

Для определения целесообразности замены одного трансформатора на два маломощных проведем технико-экономическое сравнение вариантов на рис. 2.

Пример. Производственный цех предприятия с расположенной в нём подстанцией. Режим работы цеха – односменный; круглосуточная нагрузка подстанции составляет 20 - 25% от общей нагрузки цеха. Мощность силовых трансформаторов: в первой схеме – 1000 кВА, во второй – 630 и 250 кВА (паспортные параметры трансформаторов приведены в табл. 1).

Таблица 1

$S_{H.T.}, \text{кВА}$	$U_1/U_2, \text{кВА}$	Потери, кВт		$I_x, \%$
		ΔP_x	ΔP_k	
1000	10/0,4	3,3	11,6	3
630	10/0,4	2,27	7,6	2
250	10/0,4	1,05	3,7	2,3

При расчете примем следующие исходные данные: продолжительность недели – 168 ч, продолжительность включения оборудования в рабочие сутки – 98 ч, число рабочих суток – 5, число рабочих часов $T_{РАБ}=45$ ч, число нерабочих часов $T_{НЕР} = 123$ ч, расчетная нагрузка $\Delta P_C = \Delta P_a + \Delta P_P = (I_a + I_P) \cdot R_{ПП} = (3 \div 4)\%$ от P_P (получены на основе анализа [10,11]), где I_a , ΔP_a и I_P , I_P – активные и реактивные составляющие соответственно тока и потерь мощности трансформатора; $I_T = \frac{k_3 \cdot S_{H.T.}}{U_2}$ – ток трансформатора, приведенный к U_2 .

Выполним приближенный расчет потерь ЭЭ в трансформаторах для двух вариантов схем (рис. 2).

Потери мощности в трансформаторах определим по формуле:

$$\Delta P_T = \Delta P_x + \Delta P_k \cdot k_3. \quad (6)$$

Общие потери ЭЭ в трансформаторах найдем как сумму потерь ЭЭ в рабочее и нерабочее время:

$$\Delta P_{РАБ} = \Delta P_T + \Delta P_C, \quad (7)$$

$$\Delta P_{НЕР} = \Delta P'_T + \Delta P'_C, \quad (8)$$

$$\Delta Q_{РАБ} = S_{H.T.} \cdot \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_3^2 \right), \quad (9)$$

$$\Delta Q_{НЕР} = S_{H.T.} \cdot \left(\frac{I_x}{100} + \frac{U_k}{100} \cdot k_{3.НЕР}^2 \right), \quad (10)$$

где $\Delta P_{РАБ}$, $\Delta P_{НЕР}$, $\Delta Q_{РАБ}$, $\Delta Q_{НЕР}$ – потери активной и реактивной мощности в трансформаторах в рабочее и нерабочее время;

$\Delta P_C = 0,03 \cdot \left(\frac{S_{H.T.}}{U_2} \right)^2 \cdot R_{ПП} \cdot \Delta P_T = \Delta P_x \cdot \Delta P_k \cdot k_{3.НЕР}$; $k_{3.НЕР}$ – коэффициент загрузки трансформатора в нерабочее время.

$$\Delta P_T = \Delta P_{РАБ} \cdot T_{РАБ} + \Delta P_{НЕР} \cdot T_{НЕР}; \quad (11)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{РАБ} \cdot T_{РАБ} + \Delta Q_{НЕР} \cdot T_{НЕР}. \quad (12)$$

Результаты расчета даны в табл. 2. Общие потери ЭЭ для схемы варианта 1 составили $\Delta P = 2358,6$ кВт·ч, $\Delta Q = 6428,64$ кВАр·ч. При использовании раздельного питания экономия ЭЭ за неделю составит 839,25 кВт·ч и 3520,62 кВАр·ч.

Таблица 2

Вариант	$S_{Н.Т.}$ кВ·А	S_P , кВ·А	k_3^2	I_T , А	$\Delta P_{РАБ}$, кВт	$\Delta P_{НЕР}$, кВт	$\Delta Q_{РАБ}$, кВАр	$\Delta Q_{НЕР}$, кВАр	ΔP , кВт·ч	ΔQ , кВАр·ч	tg φ
1	1000	700	0,49	1750	38,2	5,2	56,95	31,43	2358,6	6428,64	0,09
2	630	539	0,73	1347	23,5	-	37,89	-	1057,5	1705,05	0,07
	250	161	0,41	402,5	5,9	1,6	10,36	5,99	462,3	1202,97	0,07

Определив экономию, можно при заданной стоимости ЭЭ и оборудования провести технико-экономический расчет и на его основе сделать выводы.

Предложенные варианты схем электроснабжения могут быть рекомендованы к применению на промышленных предприятиях, работающих в одну смену, но эффективность модернизируемой схемы конкретно может быть определена только на основании технико-экономического расчета.

Для приведенного примера стоимость сэкономленной ЭЭ в год составит $C = W \cdot N \cdot C_0 = 839,25 \cdot 52 \cdot 3,9 + 3520,62 \cdot 52 \cdot 4,9 = 1067,25$ т.р., где $N = 52$ – число недель в году; $C_{0a} = 3,9$ руб./кВт·ч – стоимость 1 кВт·ч ЭЭ;

$C_{0p} = 4,9$ руб./кВАр·ч – стоимость 1 кВАр·ч ЭЭ.

Расходы на установку трансформаторов составят (с учетом монтажа и пуско-наладочных работ)

$$C_{T630} + C_{T250} = 349000 + 178000 = 527 \text{ т.р.}$$

При этом предприятие может получить прибыль с возможной продажи трансформатора мощностью 1000 кВ*А в размере (с учетом демонтажа) $C_{T1000} = 196500$ р. Капиталовложения в данном случае

$$K = (C_{T630} + C_{T250}) - C_{T1000} = 527000 - 196500 = 330,5 \text{ т.р.},$$

срок окупаемости капиталовложений

$$T_{OK} = K / C = 330,5 / 1067,25 = 0,31 \text{ г.}$$

Таблица 3

Схемы электроснабжения промышленных предприятий	
Достоинства	Недостатки
<i>Питание технологической и круглосуточной нагрузки от одного трансформатора</i>	
<p>Меньшее число необходимых трансформаторов и, как следствие, меньше затраты на строительство подстанций;</p> <p>Отсутствие частых включений и отключений трансформаторов;</p> <p>Более простая электрическая схема электроснабжения и более низкая стоимость строительных и электромонтажных работ</p>	<p>Дополнительные потери ЭЭ в трансформаторах в нерабочее время;</p> <p>Пониженное качество ЭЭ в сети питания осветительных приборов из-за влияния технологической нагрузки;</p> <p>Снижение надежности из-за обесточивания силовой нагрузки и вспомогательной (освещение, вентиляция и др.) при выходе из строя основного трансформатора</p>
<i>Питание технологической и круглосуточной нагрузки от двух трансформаторов меньшей суммарной мощности</i>	
<p>Нет дополнительных потерь ЭЭ в нерабочее время;</p> <p>Более высокое качество ЭЭ в осветительной сети;</p> <p>Повышенная надежность питания круглосуточной нагрузки</p>	<p>Увеличение числа трансформаторов и некоторое усложнение схемы электроснабжения;</p> <p>Значительное увеличение числа включений и отключений силовых трансформаторов</p>

Произведенные расчеты позволяют утверждать, что замена одного на два трансформатора меньшей суммарной мощности приведет к снижению электропотребления за счет уменьшения суммарных потерь ЭЭ, что в свою очередь уменьшит эксплуатационные расходы и через 0,31 года предложенная схема электроснабжения полностью окупится.

Библиографический список

1. Быстрицкий, Г. Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин. – М.: Академия, 2003. – 176 с.
2. Цирель, Я. А. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях / Я. А. Цирель, В. С. Поляков. – Л.: Энергоатомиздат. – 1985. – 264 с.
3. Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия. – 1970. – 432 с.
4. Киреева, Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий / Э. А. Киреева. – М.: КНОРУС, 2011. – 368 с.
5. Китаев, В. Е. Трансформаторы / В. Е. Китаев. – М.: Высш. Шк., 1974. – 168 с.
6. Грачева, Е. И. Расчетное определение потерь электроэнергии в цеховых сетях / Е. И. Грачева // Проблемы энергетики. -2003. - №11-12. – С. 51 - 59.
7. Грачева, Е. И. Анализ функциональных параметров и структуры систем внутрицехового электроснабжения / Е. И. Грачева, О. В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. - №1-2. – С. 99 - 106.
8. Грачева, Е. И. Оперативное прогнозирование режима электропотребления / Е. И. Грачева, Р. С. Саитбаталова, В. А. Хатанов // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 27 - 29.

9. **Грачева, Е. И.** Определение расхода электроэнергии на основе математической модели / Е. И. Грачева, Р. С. Саитбаталова // Проблемы энергетики. – 1999. – №4. – С. 24 - 25.
10. **Грачева, Е. И.** Структурно-балансовая модель промышленного предприятия / Е. И. Грачева, Р. С. Саитбаталова, Р. С. Галеева // Проблемы энергетики. – 1999. – №11-12. – С. 82 - 88.
11. **Грачева, Е. И.** Потребление электроэнергии и электрические нагрузки: монография / Е. И. Грачева. – К.: КГЭУ. – 2012. – 112 с.

УДК 621.314.21

В.Г. Гольдштейн, А.А. Казанцев, Е.О. Солдусова, А.В. Проничев**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

Самарский государственный технический университет

Рассмотрены новые, более совершенные и эффективные по сравнению с существующими, конструкции силовых трансформаторов (СТ) для применения в распределительных электрических сетях и системах электроснабжения (ЭССЭ) России. Оцениваются перспективы, направления модернизации распределительных СТ в отечественных ЭССЭ. Констатируется необходимость замены и перехода парка существующих СТ на инновационные конструкции.

Considered new more advanced and efficient compared with the existing structure of power transformers for use in distribution net works, and power supply systems Russia. Prospects of directions and modernization of distribution in domestic essays. Stated the need to tackle the problems of transition and replacement of the existing fleet on innovative designs .

Ключевые слова: трансформатор, энергосбережение, потери, энергоэффективность, аморфные магнитные материалы, высокотемпературные сверхпроводниковые материалы.

Key words: transformer, power saving, slips, energy efficiency, amorphous magnetic materials, high-temperature superconductor materials.

В последние годы во всех отраслях экономики отмечается значительный рост объема и плотности электропотребления в системах электроснабжения (ЭСН). С учетом жестких требований по его качеству и надежности наиболее эффективным и кардинальным решением этой проблемы является применение инновационного электрооборудования (ЭО). Для подстанций это СТ, обмотки которых выполняются с использованием явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), а сердечники – из аморфных ферромагнитных материалов (АФМ). ВТСП и АФМ используются в конструкциях СТ как по отдельности, так и совместно.

Все это особенно актуально для напряженных и ответственных ЭСН мегаполисов. Можно исключить ступени ЭСН на напряжениях 35 - 110 кВ и распределять электроэнергию в городе на напряжениях 10 - 20 кВ. При этом значительно снижаются затраты на сооружение подстанций и можно существенно увеличить токи рабочих режимов. Однако следует констатировать, что названные прогрессивные мероприятия пока не имеют широкого применения в существующих системах ЭСН.

Связано это с тем, что отечественная электротехническая промышленность практически еще не освоила производство названного ЭО, а зарубежное – по многим причинам еще не получило должного распространения. Кроме того, имеет место недостаток информации по созданию и эксплуатации перспективных систем ЭСН и, прежде всего, в том, что связано с построением адекватных математических моделей для анализа их рабочих режимов [1 - 2].

Изложенное определило направление и цель настоящей работы как решение задачи проектирования перспективных ЭСН, содержащих ВТСП и АФМ трансформаторы. Это задача прогнозирования параметров СТ и ЛЭП, которые еще не в полной мере освоены отечественной промышленностью, а в ряде случаев только разрабатываются. Тем не менее, данные об этих параметрах уже сейчас необходимы для создания инновационных ЭСН.

Потери электроэнергии ΔW в электроустановках ЭССЭ при передаче, распределении и потреблении электроэнергии – это с точки зрения закона сохранения энергии неизбежные энергетические и экономические затраты на обеспечение физической сущности названных технологических процессов. Можно констатировать, что данные затраты, в частности, связанные с выделением тепла, за исключением его полезного использования, наносят вред как самому электрооборудованию, так и окружающей среде.

Поэтому, несмотря на то, что проблема снижения суммарных потерь электрической мощности и энергии (ПЭМЭ) в электроэнергетике всегда была и есть в центре внимания эксплуатации, научных исследований, проектирования и конструирования новых электроустановок и процессов, можно констатировать непреходящую актуальность и необходимость поиска новых решений. В современных условиях потери электроэнергии и мощности можно существенно снизить применением в конструкциях силовых трансформаторов (СТ) следующих инновационных решений:

- использование эффекта сверхпроводимости (СП) низко- и высокотемпературной (НТСП, ВТСП) для кардинального уменьшения нагрузочных потерь в обмотках СТ [3 - 4];

- внедрение новых эффективных способов формирования основного магнитного потока СТ с помощью аморфных ферромагнитных материалов (АФМ) и перспективных бессердечниковых конструкций СТ для значительного (в 5 - 6 раз) снижения потерь холостого хода трансформатора [5 - 6];

- применение комбинированной конструкции, сочетающей в себе применение АФМ для производства магнитопровода, и материалы, обладающие ВТСП эффектом, для изготовления обмоток СТ [1].

Силовой трансформатор – наиболее ответственная и дорогостоящая электроустановка в ЭССЭ, а применение новых материалов увеличивает его стоимость. Поэтому необходимо, чтобы этот элемент сети функционировал с высокой надёжностью и стабильностью [6].

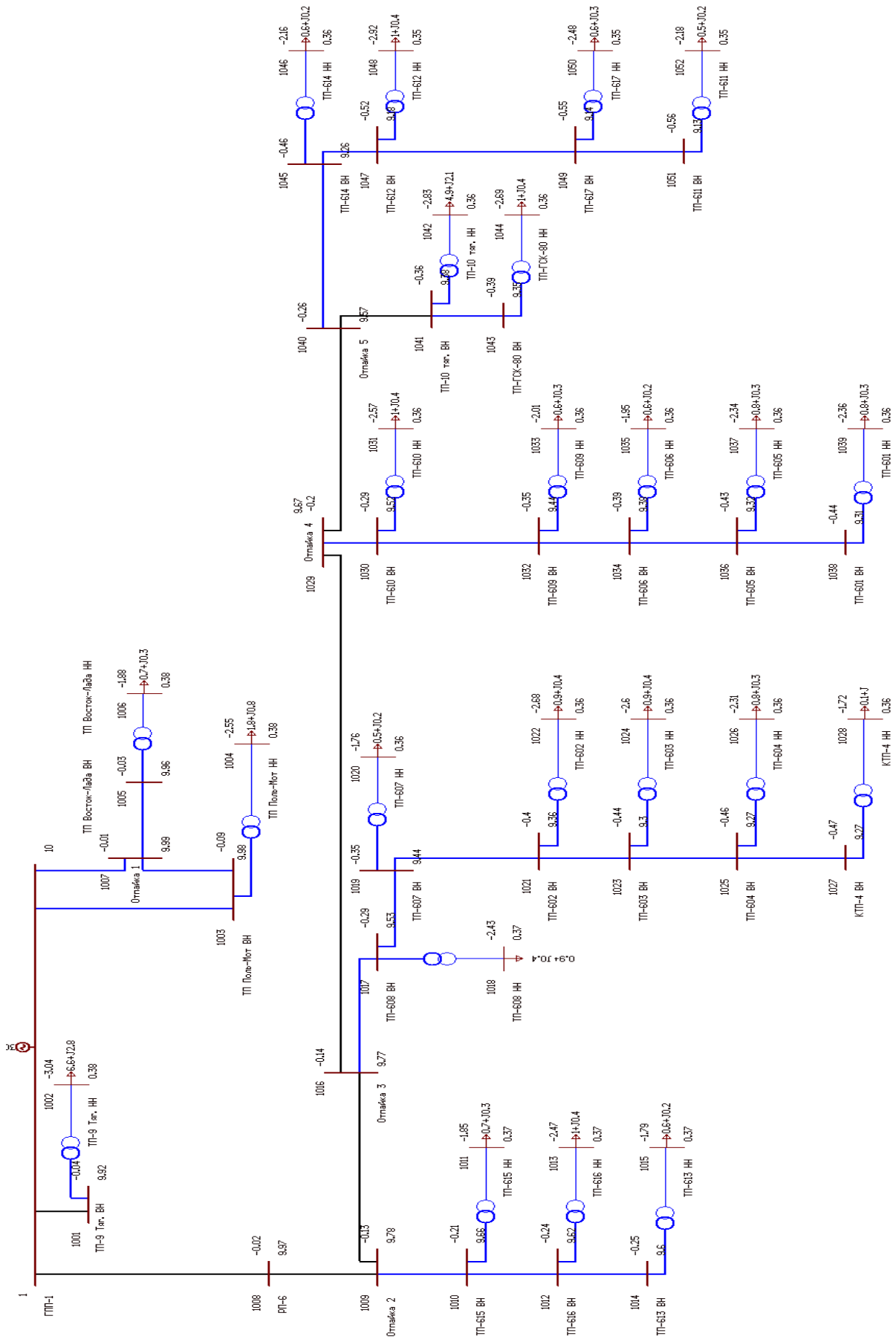


Рис. 1. Фрагмент сети ГПП-1 г. Тольятти

Результаты

Для фрагмента сети ГПП-1 г. Тольятти (рис. 1) на напряжение 10 и 20 кВ была смоделирована замена традиционных ТМ на всех трансформаторных подстанциях с учетом реальных нагрузок на АФТ, ВТСТ и АВТСТ. Расчеты потерь электроэнергии и мощности были выполнены в программном комплексе RastrWin3.

Была оценена эффективность применения АФТ, ВТСТ и АВТСТ по сравнению с ТМ путем определения суммарных потерь в линиях электропередачи и в трансформаторах схемы на рис. 1. Графически результаты расчетов для всех видов трансформаторов в сетях 10 и 20 кВ представлены на рис. 2.

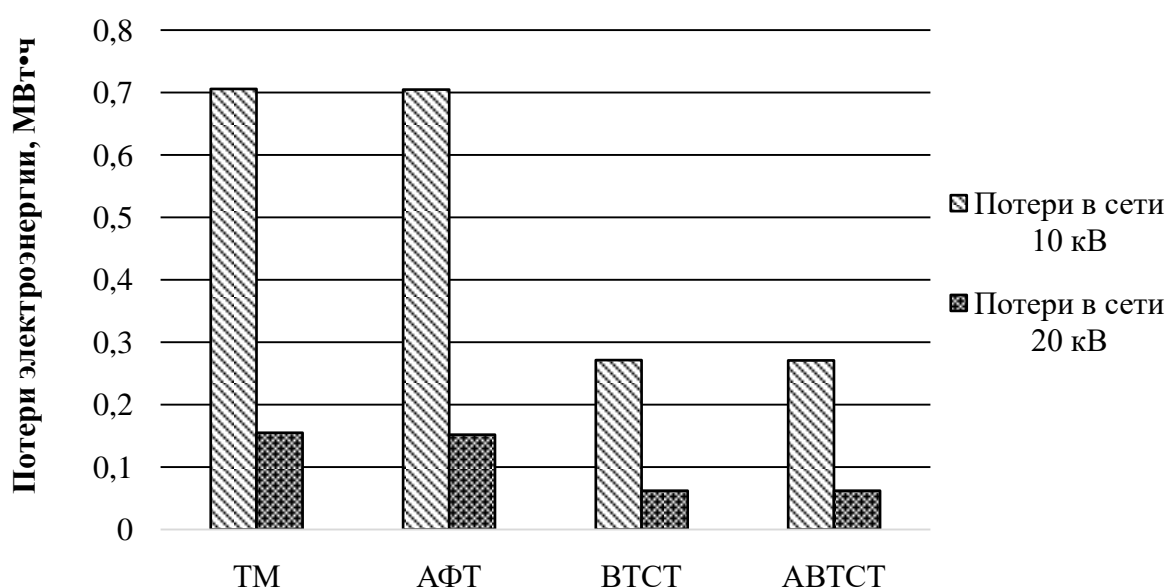


Рис. 2. Результаты расчетов суммарных потерь в сетях 10 и 20 кВ

Из результатов проведенных экспериментов стало видно, что энергоэффективность инновационных трансформаторов значительно выше, чем энергоэффективность трансформаторов с традиционным исполнением магнитопровода. Также можно отметить, что удельные потери в сети 20 кВ ниже, чем в сети 10 кВ, при использовании каждого из видов трансформаторов.

Таким образом, делаем вывод, что введение в эксплуатацию силовых распределительных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных сплавов, высокотемпературных сверхпроводниковых трансформаторов и их комбинированной конструкции является одним из наиболее перспективных путей снижения технических потерь энергосистем. Производственные способности российских производителей в изготовлении трансформаторов АФТ развиваются быстрым темпом и способны обеспечить спрос на данный тип оборудования.

Библиографический список

1. **Савинцев, Ю. М.** Анализ состояния производства в РФ силовых масляных СТ I-III габаритов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – №1. – С. 43 - 53.
2. **Александров, Н. В.** Исследование влияния сверхпроводниковых трансформаторов на режимы электроэнергетических систем. Автореф. дис. канд. техн. наук по специальности 05.14.02. Новосибирск: НГТУ, 2014.
3. **Гольдштейн, В. Г.** Анализ эксплуатационных свойств трансформаторов с сердечниками из аморфных материалов и защита их с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений / В. Г. Гольдштейн [и др.] // Вестник СамГТУ. Сер. Техн. науки. – Самара. – 2013. – №4 (40). – С. 149 - 157.
4. **Кузнецов, Д. В.** Совершенствование концепции и методов организации энергоснабжения мегаполисов / Д. В. Кузнецов, В. Г. Гольдштейн // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2.
5. **Манусов, В. З.** Ограничение токов короткого замыкания с помощью трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками / В. З. Манусов, Н. В. Александров // Известия ТПУ. – 2013. – №4. – С. 100 - 105.
6. **Berger, A.** Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers / A. Berger [et al.] // Journal of Physics: Conference Series 234. 2010.

УДК 621.365.5

Л.С. Зимин, А.С. Леоненко**ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯХ**

Самарский государственный технический университет

Рассматривается задача достижения максимальной энергоэффективности технологических комплексов «индукционная нагревательная установка – обработка металла давлением». Оптимизация индукторов производится с учетом параметров деформирующего оборудования (пресс, прокатный стан). Анализируются особенности индукционного нагрева тел прямоугольной формы, например, слэбов под прокатку. Здесь возникают тепловые и электродинамические проблемы.

We consider the problem of maximum efficiency of technological complexes "induction heating – metal treatment by pressure". Optimization of inductors is made taking into account the parameters of the deforming equipment (press, rolling mill). Was analyzed the characteristics of the induction heating bodies of rectangular shape, for example, the slab before rolling. Here, in contrast to the heating of cylindrical billets, thermal and electrodynamic problems arise.

Ключевые слова: деформация, нагрев, индуктор, краевой эффект, вибрации.

Key words: deformation, heating, inductor, edge effect, vibration.

В технологиях нагрева металла для горячего пластического деформирования наиболее перспективно применение индукционного нагрева. При этом всегда ставится задача достижения максимальной энергоэффективности технологических комплексов «индукционная нагревательная установка (ИНУ) – обработка металла давлением (ОМД)». Традиционный путь выполнения такой задачи состоит в решении локальных задач оптимизации отдельно для нагревательной установки и деформирующего оборудования в жестких рамках заданных технологических инструкций, формируемых за пределами этих задач. Качественно более широкие возможности появляются при совместной оптимизации этих процессов, преследующей достижение предельных значений совокупного экономического показателя работы комплекса в целом. Здесь целесообразен системный подход, когда ИНУ рассматривается в едином комплексе с ОМД [1].

С точки зрения конструкции ИНУ в работе исследования ограничиваются двумя основными формами нагреваемых заготовок - прямоугольной и цилиндрической, а из наиболее распространенных видов горячей ОМД в металлургическом производстве рассматриваются прокатка (слябинг) и прессование [2]. При этом система индукционного нагрева включает: ИНУ, источник питания, системы электроснабжения и управления. Определяющая роль температурного фактора позволяет описать комплекс «ИНУ-ОМД» поведением температурного поля обрабатываемого металла на соответствующих стадиях технологического

процесса. В общем случае это уравнение Фурье-Кирхгофа, отражающее на первой стадии нагрев металла в индукторе, на второй - его охлаждение при транспортировании к деформирующему оборудованию, и на третьей - температурное поле в процессе ОМД. Из всех затрат при функционировании комплекса «ИНУ-ОМД» преобладающее значение имеют затраты на нагрев. Так, расход электроэнергии при индукционном нагреве алюминиевых сплавов в среднем равен - 280 кВт.ч/т, расход энергии на деформацию для обжимных станов – до 80 кВт.ч/т, при прессовании – до 50 кВт.ч/т. [3].

Если индукционный нагрев цилиндрических тел, которые в основном являются заготовками при прессовании, довольно хорошо изучен, то при использовании индукционного нагрева в листопрокатном производстве возникает ряд особенностей. Были проведены исследования на промышленной частоте тока температурных полей алюминиевых слябов толщиной 0,3 - 0,5 м, характерной, например, для Самарского металлургического завода.

Как показали исследования, распределение удельной плотности внутренних источников тепла для этих двух сплавов имеет резко отличный характер. Так, в случае алюминиевых слябов угловые зоны и ребра всегда будут иметь положительный температурный градиент по сравнению с серединами граней. В случае титановых слябов наблюдается обратная картина. Причина заключается в разных значениях для этих сплавов величины удельного электросопротивления и соответственно глубины проникновения тока.

Это явление, характеризующее тепловыделение в прямоугольной области, вызывает, наряду с продольным краевым эффектом, ослаблением магнитного поля на концах любых заготовок (прямоугольных и цилиндрических), вызывает также поперечный краевой эффект [4]: появление градиентов температуры по периметру поперечного сечения заготовки. Степень проявления этого эффекта зависит от электрических и теплофизических свойств нагреваемого металла, размеров поперечного сечения, частоты тока индуктора и величины тепловых потерь. Так, на промышленной частоте тока это приводит к тому, что у алюминиевых слябов угловые зоны перегреваются по сравнению с центральными, а у титановых – наоборот.

Другое характерное явление, характеризующее индукционный нагрев прямоугольных тел, заключается в том, что электромагнитные процессы в системе «индуктор-металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, но и объемной плотностью электромагнитного поля и связанными с ней электродинамическими усилиями. Если в плавильных печах электродинамические силы играют положительную (могут улучшить перемешивание жидкого металла), то при индукционном нагреве под деформацию механическое проявление электромагнитной энергии играет резко отрицательную роль, так как возникает проблема устойчивости конструкций индукторов против вибраций, появляющихся под действием электродинамических сил. Особенно остро эта проблема проявляется при индукционном нагреве прямоугольных заготовок [5]. В индукторах для нагрева цилиндрических заготовок отсутствуют условия для возникновения значительных вибраций (круглое по-

перечное сечение обладает большой естественной жесткостью), а в индукторах прямоугольной формы необходимо принимать во внимание малую устойчивость прямолинейных участков обмотки индуктора. Причем суть проблемы представляет не механическая прочность медной трубки индуктора, поскольку возникающие напряжения изгиба гораздо меньше допустимых для меди, а сильная вибрация и сопровождающий ее шум, которые, если не принимать специальных мер, значительно превышают санитарные нормы для производственных помещений.

Исследования показали, что при одинаковой удельной мощности наибольшее давление будет испытывать обмотка индуктора, предназначенного для нагрева немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением. Типовым в этом отношении является нагрев алюминиевых слябов на промышленной частоте. В самом общем случае для определения распределённых усилий по всему индуктору был использован закон Био-Савара-Лапласа, который позволяет найти вектор магнитной индукции в электрических системах любой сложности и тем самым определить настил тока в слябе. Затем, разбив заготовку на конечное число прямоугольных контуров и определив значения токов в этих контурах, а также найдя значение тока в обмотке индуктора с учетом взаимоиндуктивности, рассчитанной по известной формуле двух коаксиальных прямоугольников по методу ряда Тейлора, определены электродинамические усилия как на обмотку индуктора, так и на поверхность заготовки. При исследовании вибродинамической модели индуктора была синтезирована форма оптимальной оболочки индуктора по критерию минимального шумоизлучения (максимальной жесткости).

Исследована индукционная установка промышленной частоты мощностью 1500 кВт для нагрева алюминиевого сляба размерами 0,3x1,24x2,4 м. Обмотка индуктора, выполненная медной трубкой 26x32 мм со смещенным отверстием диаметром 18 мм, армирована стеклопластиком и заключена в бетонные блоки оптимальной формы. Шум такой установки не превышал 65 дБ, а без бетонных блоков достигал 125 дБ.

И, наконец, для индукционного нагрева крупногабаритных алюминиевых слябов по энергетическим и технологическим соображениям вполне приемлема промышленная частота тока. В этом случае возникает проблема электромагнитной совместимости напряжений питания индукторов и трехфазной системой электроснабжения. Эта проблема рассмотрена в [6].

Действительно энергоэффективный технологический комплекс «ИНУ - деформация» можно спроектировать только с учётом его системы электроснабжения (СЭС). Под энергоэффективным проектированием СЭС комплекса ИНУ понимается построение наиболее экономичного её варианта при соблюдении технических условий, накладываемых как элементами СЭС, так и потребителями ИНУ. В качестве экономического критерия энергоэффективности целесообразно принимать суммарные приведенные затраты на СЭС, которые определяются технологическими, электротехническими и топологическими параметрами. К технологическим относятся: технологическая схема процесса

«ИНУ – деформация» с указанием режимов работы, количества и мощности ИНУ, частоты тока, требований к надёжности электроснабжения и регулированию мощности; к электротехническим: напряжение и число фаз (при частоте 50 Гц) ИНУ, количество и мощность источников питания, компенсирующих устройств, конструктивное исполнение сети; к топологическим: координаты расположения ИНУ, источников питания, компенсирующих устройств, а также конфигурация сети.

Библиографический список

1. **Егиазарян, А. С.** Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок / А. С. Егиазарян, Л. С. Зимин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 63 - 67.
2. **Зимин, Л. С.** Ключевые проблемы при эксплуатации индукционных нагревателей / Л. С. Зимин, А. С. Егиазарян // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2017. – №1 (53). – С. 179-182.
3. **Зимин, Л. С.** Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов / Л. С. Зимин, А. С. Егиазарян // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 203 - 208.
4. **Егиазарян, А. С.** Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве / А. С. Егиазарян, Л. С. Зимин // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2010. – Вып. – № 7 (28). – С. 231 - 233.
5. **Зимин, Л. С.** Acoustic and vibration problems at induction heating. HIS-98. Proceedings of International Induction Heating Seminar – Padua (Italy), 1998, – P. 499 - 505.
6. **Егиазарян, А. С.** Анализ режимов электроснабжения индукционных установок / А. С. Егиазарян // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – №3. – С. 74 – 76.

УДК 621.311

В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, О.А. Камаева**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

Юго-Западный государственный университет

Статья посвящена вопросам непрерывного контроля состояния изоляции кабельных линий и других электроустановок. Выявлены недостатки существующих методов испытаний и диагностики, выполнен анализ принципов работы существующих устройств автоматизированного контроля изоляции. Предложено применение токов обратной и нулевой последовательности для осуществления мониторинга изоляции фаз относительно земли и относительно друг друга.

The article is devoted to the issues of continuous monitoring of the cable lines insulation state and other electrical installations. The disadvantages of existing testing and diagnostics methods are revealed, the principles of operation of existing automated insulation control devices are analyzed. The use of reverse and zero sequence currents is proposed for monitoring the phase isolation relative to the ground and relative to each other.

Ключевые слова: изоляция, надежность, кабельные линии, замыкание фаз, токи нулевой последовательности, токи обратной последовательности, автоматизированный контроль, электроустановки.

Key words: insulation, reliability, cable lines, phase closures, zero sequence currents, reverse sequence currents, automated control, electrical installations.

Надежность работы электроэнергетических систем во многом зависит от состояния элементов, входящих в их состав. Кабельные линии осуществляют электроснабжение многочисленных потребителей электроэнергии в промышленности, на транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве. Бесперебойная работа кабельных линий в значительной мере зависит от качества изоляции данных линий. Нарушение изоляции приводит к пробоям и возникновению повреждений, сопровождающихся замыканием одной или более фаз линии на землю и замыканием двух или трех фаз между собой.

Пробой изоляции вызывается рядом причин, обуславливающих постепенное старение изоляции и снижение ее диэлектрической прочности, например, действие электрического поля, тепловое воздействие, влияние окружающей среды и другие факторы. В большинстве случаев такие повреждения развиваются за сравнительно краткий период времени (от нескольких месяцев, до нескольких дней) [1]. Поэтому задача осуществления постоянного контроля состояния изоляции кабельных линий актуальна. В полной мере такая задача может быть решена с применением достижений современной техники на основе создания системы автоматизированного контроля состояния изоляции.

В настоящее время находят все большее применение диагностические методы контроля изоляции. Эти методы позволяют получать оценку состояния изоляции и остаточного ресурса электрооборудования. При проведении диагностики не требуется испытаний контролируемого оборудования повышенным напряжением, что благоприятно сказывается на состоянии электроустановок [2 – 5].

Следует учитывать, что для проведения процессов диагностики традиционными способами требуется выводить электрооборудование из работы, что не всегда экономически оправдано и удобно. Следовательно, необходимо применение постоянного контроля изоляции, обеспечивающего заблаговременное обнаружение возникновения и развития повреждения оборудования. Это позволит своевременно принимать меры по снижению ущерба от перерывов в электроснабжении потребителей.

В настоящее время известны устройства автоматического контроля изоляции, например, устройство автоматического контроля изоляции «АСТРО-ИЗО-470» [6]. Данное устройство и его аналоги обеспечивают контроль сопротивления изоляции как однофазных, так и трехфазных электроустановок относительно земли. Поэтому такие устройства могут своевременно выявлять дефекты фазной изоляции относительно земли.

В трехфазных электроустановках, в том числе и кабельных линиях, работа подобных устройств обеспечивается измерением токов и напряжений нулевой последовательности [7]. Между тем, частота возникновения замыканий между фазами кабельных линий является сопоставимой с возникновением замыканий фаз на землю. Так, по данным [8] в электрических сетях напряжением 6 кВ города Мурманска в 2009 г. произошло 7 выходов из строя кабельных линий вследствие замыканий одной фазы на землю и 8 выходов из строя кабельных линий по причине замыкания между фазами. Для 2010 г. таких случаев зарегистрировано 8 и 6 соответственно.

Приведенная статистика показывает, что повреждения междуфазной изоляции являются достаточно распространенным явлением, также требующим постоянного контроля. Оценка состояния изоляции между фазами может быть получена с применением контроля токов обратной последовательности [9, 10].

При примерно одинаковом состоянии изоляции линии и присоединения нельзя однозначно установить источник появления данных токов. Также причиной появления токов обратной и нулевой последовательности может служить несимметрия нагрузки. Поэтому в этом случае сделать обоснованный вывод, что же является причиной возникновения данных токов – снижение уровня изоляции контролируемой линии, возникновение ослабленной изоляции вне зоны контроля или же несимметричная нагрузка – не предоставляется возможным (рис. 1).

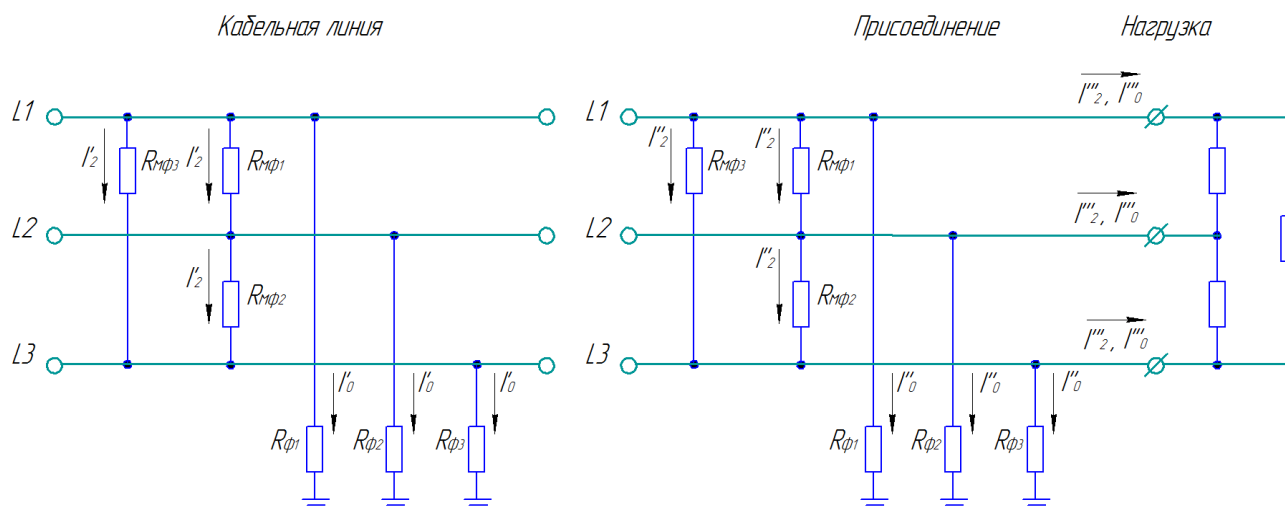


Рис. 1. Токораспределение в контролируемой системе

Для решения такой проблемы предлагается использовать устройство для сбора информации по токам обратной и нулевой последовательности, состоящее на постоянной основе или временно из двух комплектов (рис. 2). Один комплект должен постоянно находиться в начале контролируемой линии, второй может устанавливаться на постоянной основе или же временно в конце линии.

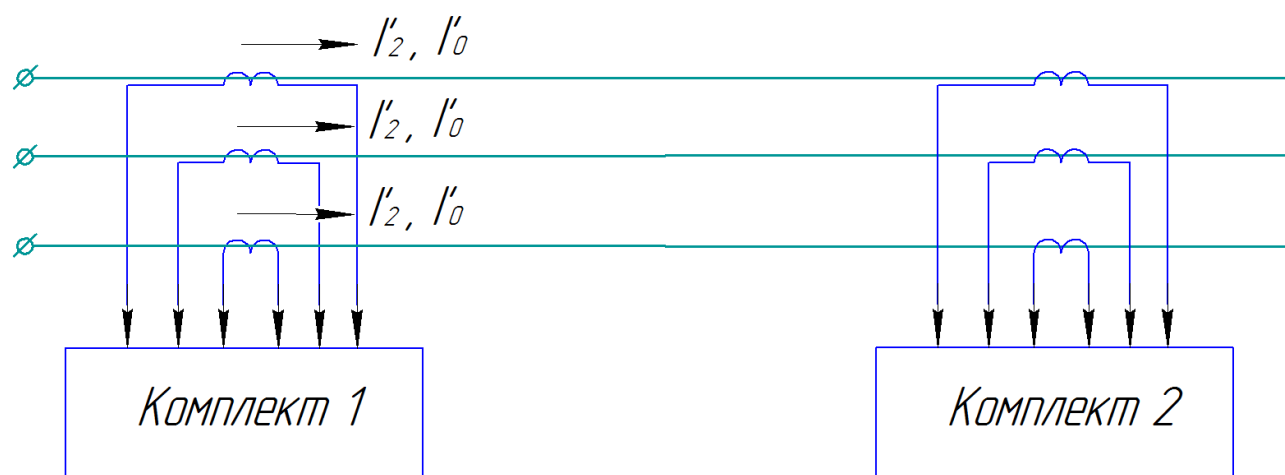


Рис. 2. Расположение комплектов на контролируемой линии

Как видно из рис. 3, при возникновении повреждения изоляции за пределами контролируемой линии токи обратной и нулевой последовательности протекают как в начале, так и в конце защищаемой линии. Следовательно, разность токов начала и конца линии будет примерно равна нулю. Если поврежде-

ние возникает на защищаемой линии, то разность токов становится отличной от нуля, и появляется сигнал о повреждении изоляции на защищаемой линии.

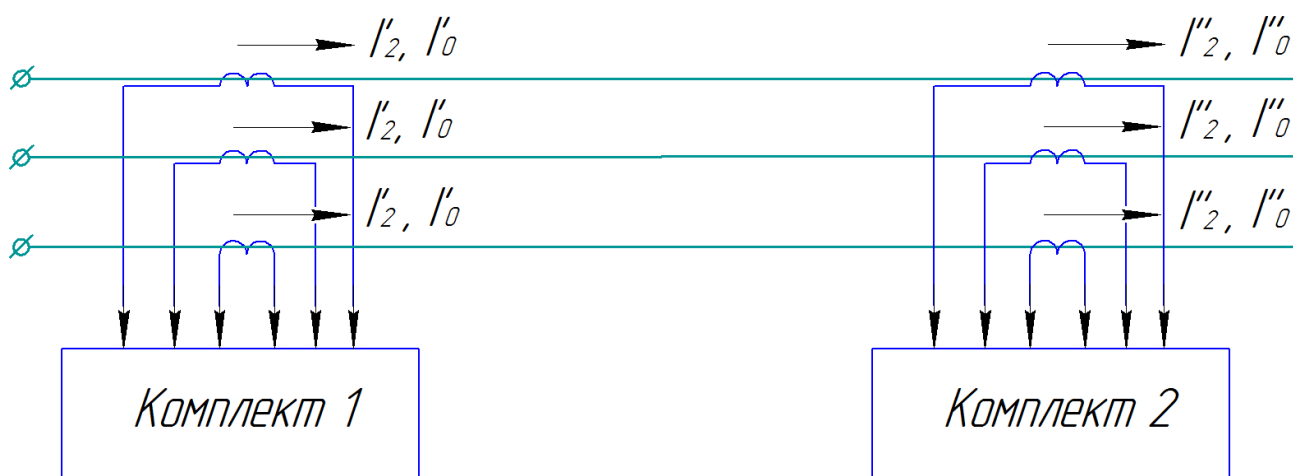


Рис. 3. Ослабление изоляции за пределами КЛ

Такое выполнение подсистемы сбора информации позволит четко определять причины возникновения токов обратной и нулевой последовательности. При ослаблении изоляции контролируемой линии уровень этих токов будет выше в начале линии, чем в ее конце, даже при наличии пониженного уровня изоляции вне линии или несимметричной нагрузке.

Приведенные данные показывают, что в автоматизированных устройствах контроля состояния изоляции кабельных линий и других электроустановок требуется постоянное слежение не только за токами нулевой последовательности, но и за токами обратной последовательности. Такое сочетание контролируемых параметров обеспечит постоянный мониторинг изоляции фаз как по отношению к земле, так и по отношению друг к другу. Это повысит надежность электроснабжения потребителей, так как становится возможным своевременно выявлять возникновение потенциально опасные нарушения изоляции электроустановок.

Библиографический список

1. **Конюхова, Е. А.** Надежность электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева. – М.: Энергопрогресс, 2001. – 92 с.
2. **Привалов, И. Н.** Методы испытаний и диагностики силовых кабельных линий напряжением до 35 кВ // Известия НИИПТ, 2004. – № 60.
3. **Чернышев, В. А.** Определение состояния и остаточного ресурса силового электро-технического оборудования / В. А. Чернышев, Е. В. Зенова, В. Р. Григорян // Электричество, 2011. – № 1.

4. **Канискин, В. А.** Эксплуатация силовых электрических кабелей. Ч. 7. Методы испытаний и диагностики силовых кабелей: учеб. пособие / В. А. Канский, А. И Таджибаев. – СПб.: Изд-во Петербург. энергетич. ин-та повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства энергетики РФ, 2003.
5. **Шкляр, А.С.** Будущее кабельных линий – комплексная диагностика // Кабель-News, 2009. – №5. – С. 21 – 23.
6. Контроль изоляции. Обнаружение ее повреждений [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elecab.ru/nva22.shtml>
7. **Пат. РФ № 112525.** Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий / Н.К. Полуянович, А.В. Стульнева, М.Н. Дубяго. Оpubл. 10.01.2012. Бюл. №1.
8. **Пикин, Д.Г.** Анализ статистики аварий и отказов в электрических сетях Мурманска // Cloud of Science. – 2013. – № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://cloudofscience.ru>
9. **Дьяконов, В. П.** MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения / В. П. Дьяконов. – М.: «СОЛОН-Пресс», 2008. – 800 с.
10. **Авербух, А.М.** Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий.– Л.: Энергия, 1979. – 184 с.

УДК 621.316.15

Н.М. Кузнецов

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН)

Рассмотрены разработанные автором технико-экономические решения по эффективному потреблению электроэнергии на горных предприятиях, позволяющие осуществлять экономию электроэнергии при эксплуатации систем электроснабжения. Показана зависимость удельных расходов электроэнергии от производительности при измельчении руды.

The technical and economic solutions developed by the author for effective electric power consumption at mining enterprises in the article are considered, that allow to save electricity during the operation of power supply systems. The dependence of the specific electric power consumption on productivity at ore grinding is shown.

Ключевые слова: электроэнергия, потери мощности, экономия энергии, компенсирующие устройства, удельный расход электроэнергии

Key words: electricity, power losses, energy saving, compensating devices, specific electricity consumption

Для построения надежной системы электроснабжения горных предприятий важно учитывать различные факторы, что позволяет осуществлять экономию электроэнергии и улучшать управление технологией, качественно проектировать системы электроснабжения [1 - 3].

При передаче электроэнергии от шин подстанций по линии электроснабжения теряется до 15 % электроэнергии. Потери активной мощности от источника электроэнергии к приемнику в системе электроснабжения определяются по формуле

$$\Delta P = 3I^2 R ,$$

где I – ток в фазе линии; R – сопротивление фазы линии.

Полная мощность, передаваемая по сети, равна

$$S = UI , \text{ или } S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \times R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_A + \Delta P_p ,$$

где $\Delta P_A = \frac{P^2}{U^2} R$, Вт, – потери активной мощности при передаче активной мощности; $\Delta P_p = \frac{Q^2}{U^2} R$ – потери активной мощности при передаче реактивной мощности.

Таким образом, от передачи реактивной мощности в линии электроснабжения имеются потери активной мощности от реактивного тока, которые пропорциональны квадрату передаваемой реактивной мощности.

Реактивная мощность потребителей с КУ определяется по уравнению

$$Q = Q_{ДК} - Q_{КУ},$$

где $Q_{ДК}$ – реактивная мощность нагрузки до компенсации, ВАр; $Q_{КУ}$ – реактивная мощность КУ, ВАр.

Расчетные значения полной мощности трансформатора $S_{ДК}$, тока в линии между трансформатором и нагрузкой $I_{ДК}$, потери активной мощности в сети $\Delta P_{ДК}$ равны:

$$S_{ДК} = \sqrt{P^2 + Q_{ДК}^2};$$

$$I_{ДК} = \frac{S_{ДК}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{ДК}^2}}{\sqrt{3}U_{ном}};$$

$$\Delta P_{ДК} = 3I_{ДК}^2 R = \frac{S_{ДК}^2}{U_{ном}^2} R = \frac{P^2 + Q_{ДК}^2}{U_{ном}^2} R.$$

Те же параметры после компенсации реактивной мощности:

$$S_{ПК} = \sqrt{P^2 + (Q_{ДК} - Q_{КУ})^2};$$

$$I_{ПК} = \frac{\sqrt{P^2 + (Q_{ДК} - Q_{КУ})^2}}{\sqrt{3}U_{ном}};$$

$$\Delta P_{ПК} = \frac{P^2 + (Q_{ДК} - Q_{КУ})^2}{U_{ном}^2} R.$$

Следовательно, применение компенсирующих устройств (КУ) позволяет уменьшить полную мощность трансформаторов, снизить ток в элементах сети между источником питания и приемником, уменьшить активные потери мощности в сети.

Выбор КУ для конкретной сети электроснабжения осуществляется путем технико-экономического анализа [4, 5], в результате которого сопоставляются снижение стоимости потерь ЭЭ и затрат на установку КУ. Наибольший экономический эффект достигается при размещении КУ в непосредственной близо-

сти от приемника. Индивидуальная компенсация наиболее эффективна у мощных электроприемников.

В результате инструментального обследования электрических сетей обогатительной фабрики выявлено, что трансформатор ТМ-1000 6/0,4 кВ до компенсации нагружен активной мощностью $P = 560$ кВт и реактивной $Q_{ДК} = 780$ кВАр. Коэффициент мощности имеет фактическое значение 0,59.

Кабельная линия 2х(СБГ 6 3х95, 50 м) имеет сопротивление:

$$R = 2(0,194 \text{ Ом/км} \times 0,05 \text{ км}) = 0,0194 \text{ Ом.}$$

Полная нагрузка трансформатора до компенсации:

$$S_{ДК} = \sqrt{P^2 + Q_{ДК}^2} = \sqrt{560^2 + 780^2} = 960,2 \text{ кВА.}$$

Ток в линии:

$$I_{ДК} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{ДК}^2}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{960,2 \times 10^3}{1,73 \times 380} = 1460,6 \text{ А.}$$

Активные потери мощности в линии:

$$\Delta P_{ДК} = \frac{P^2 + Q_{ДК}^2}{U_{ном}^2} \times R = \frac{(560^2 + 780^2) \times 10^6}{380^2} \times 0,0194 = 124 \text{ кВт.}$$

После подключения КУ - конденсаторных батарей мощностью 337,5 кВАр, полная мощность трансформатора:

$$S_{ПК} = \sqrt{P^2 + (Q_{ДК} - Q_{КУ})^2} = \sqrt{560^2 + (780 - 337,5)^2} = 713,7 \text{ кВА.}$$

Ток, протекающий в линии:

$$I_{ПК} = \frac{\sqrt{P^2 + (Q_{ДК} - Q_{КУ})^2}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{\sqrt{560^2 + 442,5^2} \times 10^3}{1,73 \times 380} = 1085,7 \text{ А.}$$

Активные потери в линии:

$$\Delta P_{ПК} = \frac{(560^2 + 442,5^2) \times 10^6}{380^2} \times 0,0194 = 68,4 \text{ кВт.}$$

Таким образом, активные потери в линии уменьшились:

$$\Delta P = \Delta P_{ДК} - \Delta P_{ПК} = 124 - 68,4 = 55,6 \text{ кВт.}$$

Экономия энергии за время работы трансформатора t_T определяется по формуле

$$\Delta W_T = \Delta P \times t_T = 55,6 \cdot 8400 = 467040 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Ток в линии с применением КУ уменьшается на 25,7 %, а полная нагрузка трансформатора уменьшилась с 960,2 кВА до 713,7 кВА. В связи с этим трансформатор можно дополнительно нагрузить активной мощностью

$$P_{\text{доп}} = \sqrt{S_{\text{Тном}}^2 - Q_{\text{ПК}}^2} - P = \sqrt{1000^2 - 442,5^2} - 560 = 337 \text{ кВт}.$$

Коэффициент мощности при подключении КУ повышается до 0,78.

Потери активной мощности в трансформаторе $\Delta P_m = \Delta P_x + \Delta P_k k_n^2$, где ΔP_x – активные потери холостого хода при номинальном напряжении, кВт; ΔP_k – активные нагрузочные потери (активные потери КЗ) при номинальной нагрузке, кВт; $k_n = S_\phi / S_n$ – коэффициент нагрузки трансформатора; S_ϕ – фактическая нагрузка трансформатора, кВА; S_n – номинальная мощность, кВА.

Потери электроэнергии в трансформаторе

$$\Delta W = \Delta P_x T_n + \Delta P_k k_n^2 T_{\text{раб}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где T_n – годовое число часов работы трансформатора равное 8760 ч; $T_{\text{раб}}$ – годовое число часов работы трансформатора с нагрузкой равной или близкой к номинальной; при одной смене $T_{\text{раб}} = 2400 \text{ ч}$, при двух – $T_{\text{раб}} = 5400 \text{ ч}$; при трех – $T_{\text{раб}} = 8400 \text{ ч}$.

Отключение трансформаторов в режимах малых нагрузок определяется минимумом потерь электроэнергии в этих трансформаторах при условии

$$S_\phi \leq S_n \sqrt{\frac{n(n-1)\Delta P_x}{\Delta P_k}},$$

где n – число однотипных трансформаторов.

Анализ коэффициентов загрузки трансформаторов цеховых подстанций обогатительной фабрики показал, что только на подстанциях можно уменьшить потери электроэнергии при отключении одного трансформатора на каждой подстанции. Результаты расчета потерь активной электроэнергии при работе одного трансформатора (ТМ - 1000) и совместной работе двух трансформаторов приведены на рис. 1. Коэффициент загрузки трансформаторов составляет 0,25. При отключении одного трансформатора на подстанции годовые потери электроэнергии уменьшатся с 109 до 89 тыс. кВт·ч (18,2%). При потребляемой мощности менее 667 кВА экономически выгоднее работа электроприемников на одном трансформаторе.

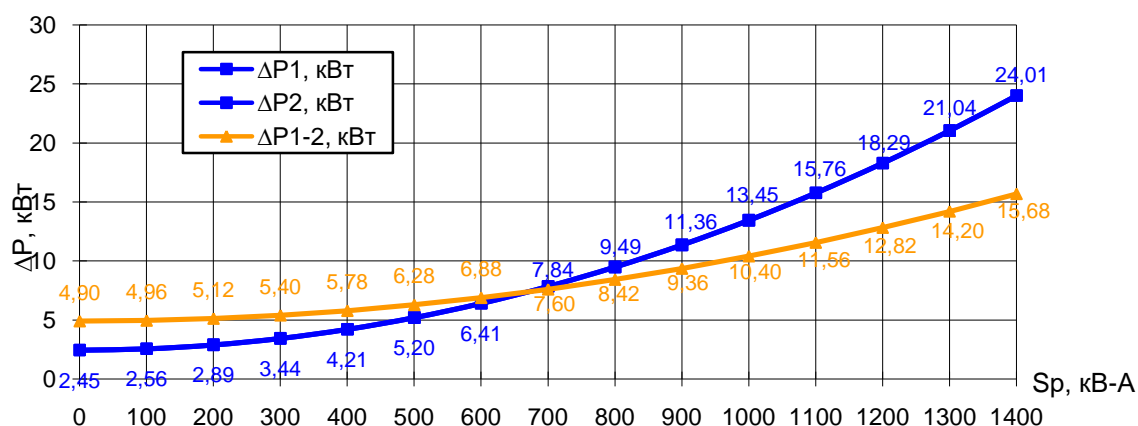


Рис. 1. Потери активной мощности в трансформаторах

Регистрация электрических параметров электрических сетей и энергоемких потребителей выполнялась с помощью анализатора электропотребления AR.5, который позволяет изменять, вычислять и сохранять в памяти основные параметры трехфазных электрических сетей. Анализ интегральных параметров, удельных расходов электроэнергии и данных инструментального обследования позволяет сделать вывод, что при изменении технологического процесса после перехода с Малеевской руды на Артемьевскую Зырянского ГОКа удельный расход электроэнергии увеличивается по мельницам № 0, № 2 и № 3 соответственно на 79, 51 и 35% (рис. 2) в связи с уменьшением производительности мельниц.

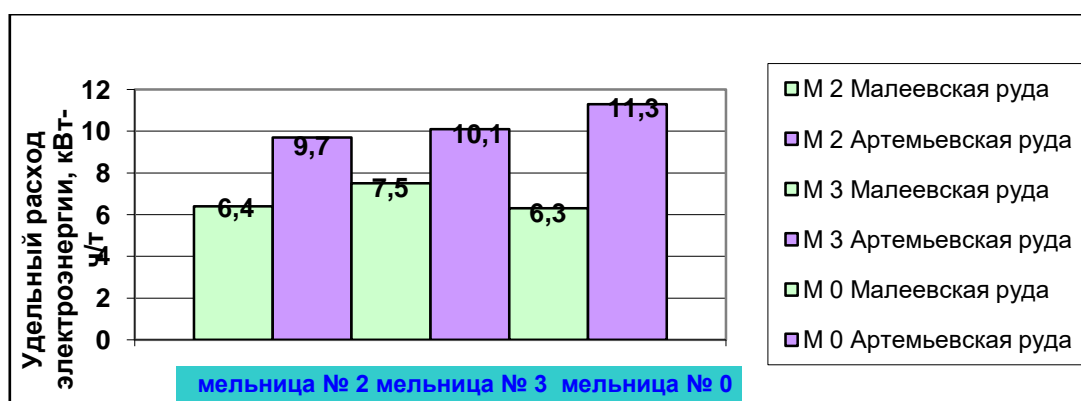


Рис. 2. Удельные расходы электроэнергии мельниц

Удельные энергетические показатели являются сложными функциями многих переменных составляющих [6 - 11], имеют свою отраслевую специфику

и зависят от факторов, характерных именно для данной отрасли промышленности.

Библиографический список

1. **Кузнецов, Н. М.** Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях / Н.М. Кузнецов, В.И. Щуцкий // Апатиты, 1997. – 211 с.
2. **Кузнецов, Н. М.** Управление электропотреблением на горно-обогатительных предприятиях путем изменения технологических факторов / Кузнецов Н.М., Щуцкий В.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 10. – С. 206 - 209.
3. **Fedorov, O.V.** Assessment of influence parameters of electric equipment at a size of losses the electric power in intra factory networks of low voltage // 2nd International Conference on Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings 2, 2016. С. 7911463.
4. **Федоров, О. В.** Инвестиции в электроснабжение предприятий: учеб. пособие / О. В. Федоров, Н. М. Кузнецов. – Новосибирск. 2010. – 120 с.
5. **Федоров, О. В.** Инновационная деятельность. учебник / О. В. Федоров, И. И. Гребенюк, В. П. Романчук. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 514 с.
6. **Кузнецов, Н. М.** Моделирование потребляемой мощности шаровой мельницы / Н. М. Кузнецов, И. Н. Морозов // Горные науки и технологии. – 2016. – №4(4). – С. 50-58.
7. **Temchenko, H.** Evaluation of energy intensity of mining and processing production in difficult financial and economic conditions // Економічний часопис-XXI. – 2016. – Т.158. – №3-4. – С. 52-56.
8. **Абрамович, Б. Н.** Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети / Б. Н. Абрамович, И. С. Бабанова // Горные науки и технологии. – 2016. – № 2(2). – С. 66-77.
9. **Аввакумов, В. Н.** Анализ и нормирование электропотребления на обогатительной фабрике / В. Н. Аввакумов, Н. М. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 1988. – № 12. – С. 4 - 5.
10. **Фёдоров, О. В.** Основы технико-экономического выбора электропривода промышленных установок: монография / О. В. Фёдоров, Э. Л. Карпова. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1991. – 190 с.
11. **Fedorov, O. V.** Alternative energy sources for remote customers / O. V. Fedorov, M. M. Kuznetsov // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6 (123). – С. 141 - 144.

УДК 621.311.001.63-52(075.8)

В.А. Павлюков, С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко

ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ УЧЕБНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДУСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Донецкий национальный технический университет

Рассмотрена разработанная учебная САПР электрической части станций и подстанций, применяемая для расчетов токов короткого замыкания и выбора основного электротехнического оборудования, а также проверки трансформаторов системы собственных нужд тепловых электростанций по условиям пуска и самозапуска асинхронных электродвигателей. Приведено описание структуры программного продукта, реализованного на платформе графического редактора Autodesk AutoCAD.

There developed educational CAD-system of electrical part of electrical power plants and substation are showing in this article. This CAD is applying for short circuit currents calculation and choice of main equipment and for checking of thermal power plants auxiliaries transformers by start-on and self-start of induction motors. The description of the software product structure realized on the platform of the graphic editor Autodesk AutoCAD is given.

Ключевые слова: САПР, электрическая часть станций и подстанций, расчет токов короткого замыкания, выбор оборудования, пуск и самозапуск асинхронных электродвигателей, Autodesk AutoCAD.

Key words: CAD, electrical part of electrical power plants and substation, short circuit currents, choosing of main equipment, start-on and self-start of induction motors, Autodesk AutoCAD.

В области электроэнергетики уже давно применяются различные системы автоматизированного проектирования (САПР) [1]: *AutoCAD[®] Electrical*, *CAD Electro[®]*, *МОДУС[®]*, *КОМПАС-Электрик[®]*, *nanoCAD Электро[®]* и др. Промышленные САПР являются сложными программными продуктами, требующими для эксплуатации специалистов высокой квалификации и денежных средств на их приобретение.

Описываемая здесь учебная САПР (УСАПР) основана на применении проектирующей системы AutoCad фирмы AutoDesk, имеющей набор собственных внутренних алгоритмических языков программирования (AutoLisp, VLA, VBA, C#), а также язык создания диалоговых окон DCL. УСАПР получила условное название CAD_Electric_Education [2]. Она имеет единое информационное обеспечение в виде библиотеки графических блоков (БГБ) и символьных баз данных (СБД). Общая структура УСАПР приведена на рис. 1.

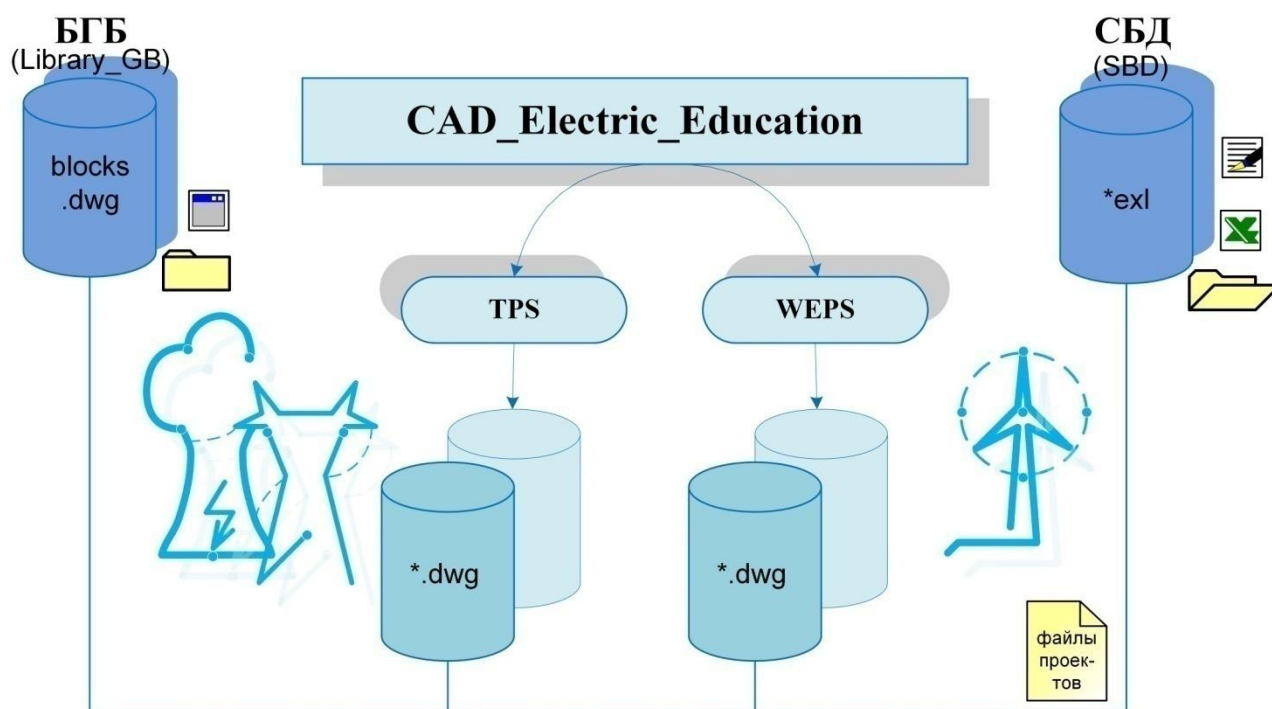


Рис. 1. Общая структурная схема системы УСАЭР

Символьная исходная информация помещена в плоские электронные таблицы (ЭТ). Отдельные разделы СБД размещаются на отдельных именованных листах книги ЭТ Microsoft Office Excel. СБД имеет открытую структуру и включает в себя современное силовое оборудование отечественных производителей, а также мировых лидеров в области электротехники: *ABB*[®], *Siemens*[®], *Schneider Electric*[®], *General Electric*[®], *Alstom Grid*[®], *Legrand*[®], *Таврида электрик* др. Пример СБД оборудования, устанавливаемого в ветроэнергетической установке (ВЭУ), показан на рис. 2.

Тип	Рн, МВт	Un, кВ	cosFi	Xd''	Ta, с	Тип	Фирма
E-126/7580	7.58	0.40	0.8	0.2	.14	SG annular	ENERCON
E-70/2000	2.00	0.40	0.8	0.2	.14	SG annular	ENERCON
FL-2500	2.50	0.69	0.95	0.24	.14	DFIG	Fuhrlander
FL-1500	1.50	0.69	0.9	0.24	.14	DFIG	Fuhrlander
FL MD 70/77	1.50	0.69	0.8	0.24	.14	DFIG	Fuhrlander
FL-1000 plus	1.00	0.69	0.8	0.24	.14	DFIG	Fuhrlander
FL-100	0.10	0.40	0.8	0.2	.14	IM, pole change	Fuhrlander
FL-800	0.80	0.69	0.8	0.2	.14	IM	Fuhrlander

Рис. 2. Пример СБД выполненной Microsoft Office Excel для генераторов ВЭУ

УСАПР включает в себя две подсистемы: **TPS** – (англ. thermal power station) – расчета КЗ и выбора основного силового оборудования тепловых электростанций (ТЭС) [3]; **WEPS** – (англ. wind electrical power station) – расчета потокораспределения в схемах выдачи мощности ветровых электростанций [4]. Первая из них включает проектные процедуры для расчета токов короткого замыкания (ТКЗ) и выбора основного силового оборудования, проверки трансформаторов системы с.н. ТЭС по условиям пусков и самозапусков электродвигателей.

Алгоритмы, лежащие в основе расчетов ТКЗ, основываются на методиках, изложенных в [5]. Расчетная схема формируется пользователем на экране монитора, как это показано на рис. 3. В целях проверки расчетных схем выполняется документирование исходных данных ее элементов.

Затем по расчетной схеме программно формируются узлы схемы. Индикация номеров узлов на схеме позволяет пользователю оценить правильность сформированной им схемы (номера узлов фрагментов схемы одного потенциала должны быть одинаковыми, как это видно на рис. 3).

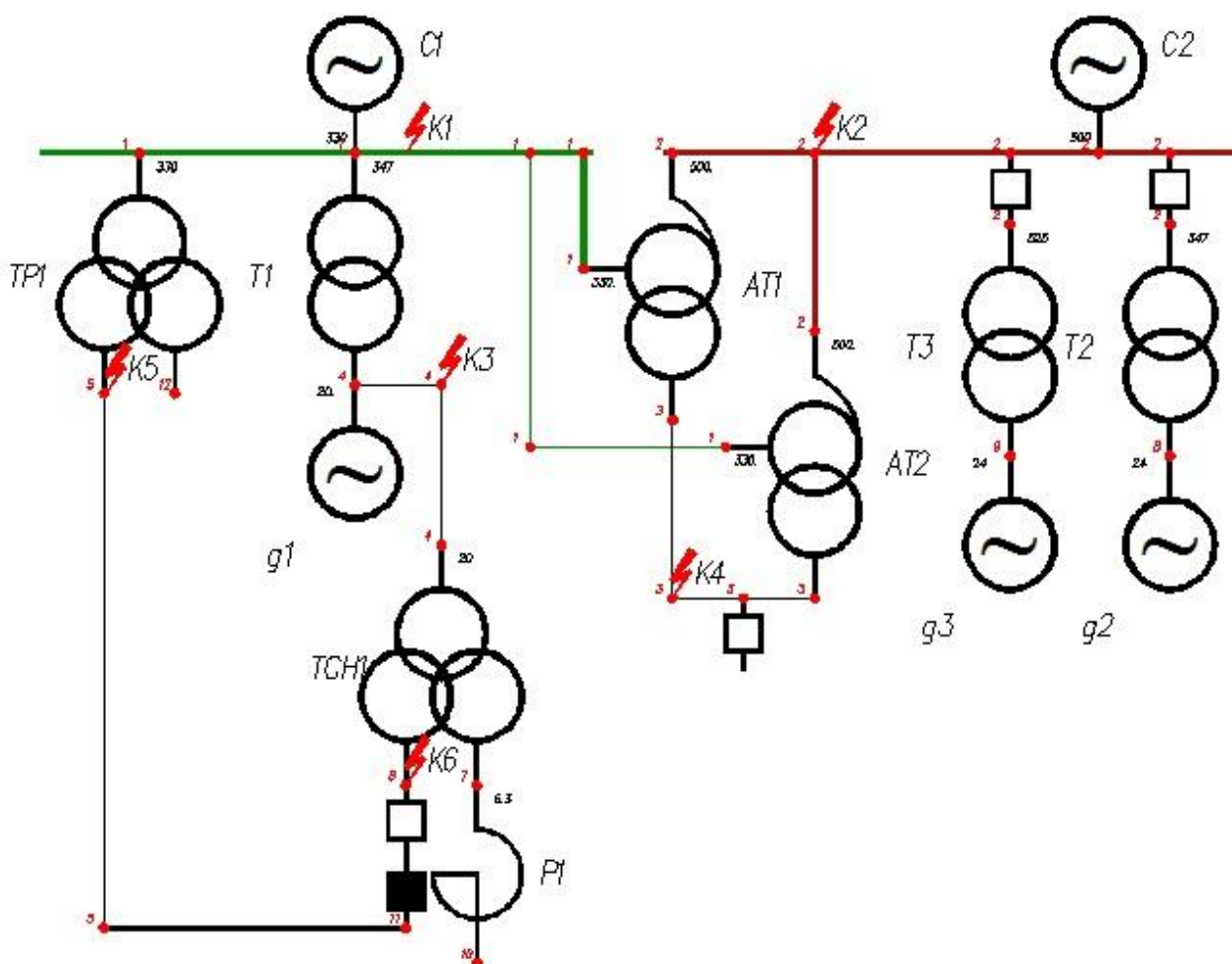


Рис. 3. Пример созданной на экране монитора расчетной схемы

Пользователь может проводить расчеты ТКЗ в отдельных узлах расчетной схемы. Индикация расчетных данных в этом случае выполняется в диалоговом окне, содержащем все составляющие суммарного тока КЗ в узле, а также его тепловой импульс. В случае КЗ на выводах генератора в диалоговом окне приводятся также составляющие тока КЗ этого генератора.

Для получения сводной таблицы ТКЗ пользователь должен предварительно выполнить установку точек КЗ в требуемых узлах расчетной схемы с указанием названия точки и ее параметров (среднего номинального напряжения и времени отключения КЗ). После выбора пункта меню «Расчет КЗ в N точках с документированием» программа выполняет расчет токов КЗ в указанных на расчетной схеме точках и формирует таблицу данных расчета КЗ (рис. 4).

Сводная таблица расчетов токов КЗ								
№ кз	Обозначение точки КЗ	Uбаз,кВ	I _{по} ,кА	I _{пг} ,кА	i _{ат} ,кА	i _{уд} ,кА	V _к ,кА*кА*с	T _а ,с
K1	ОРУ-330	340	25.5	24.1	18.4	68.4	188.6	0.089
K2	ОРУ-500	550	16	15.2	10.6	42.6	71.4	0.079
K3	на выводах Г1	20	139.6	128.3	148.1	385.5	81972.6	0.209
	от генератора		56.2	45	69.2	157.3	14018.7	0.432
K4	АТНН	37	24.8	24.8	33	69.8	740.5	1.005
K5	РТСН1	6.3	18.4	76	6.3	46.6	82.1	0.042
K6	РТСН2	6.3	21.7	75.1	12.1	56.9	124.4	0.065

Рис. 4. Пример выходного документа при расчете токов КЗ

Определение величин постоянных времени затухания апериодических составляющих токов КЗ производится путем учета активных сопротивлений элементов расчетной схемы. Расчетные значения токов КЗ заносятся на хранение во внутреннюю библиотеку AutoCAD. В дальнейшем они используются в процедурах выбора оборудования и токопроводов. В УСАПР реализованы процедуры выбора выключателей (рис. 5), разъединителей и трансформаторов тока.

<i>Выбор выключателя на ОРУ-330 HPL 420B2-63/4000 фирмы АВВ</i>		
<i>Величина</i>	<i>Расчетное значение</i>	<i>Каталожное значение</i>
<i>Номинальное напряжение, кВ</i>	340	362.
<i>Номинальный ток, А</i>	1000	4000.
<i>Периодическая составляющая тока отключения, кА</i>	25	63.
<i>Апериодическая составляющая тока отключения, кА</i>	18.4	38.6384
<i>Мгновенное значение ударного тока, кА</i>	68.4	158.
<i>Тепловой импульс, кА * кА * с</i>	188.6	11907

Рис. 5. Пример выбора выключателя на напряжение 330 кВ

В процедуре расчета пусков и самозапусков двигателей используется Т-образная эквивалентная схема замещения широкополосного АД (рис. 6).

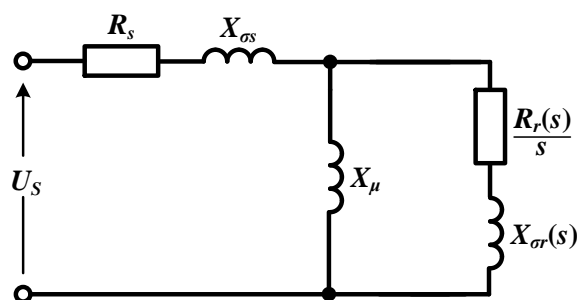


Рис. 6. Одноконтурная Т-образная эквивалентная схема замещения широкополосного АД

Ее параметры определяются методом прямого синтеза по исходным каталожным данным АД, дополненным значениями токов статора и вращающего момента для промежуточных точек скольжения. Полученная при этом система нелинейных алгебраических уравнений решается в среде пакета MathCad с использованием решающего блока Given - Minerr. На рис. 7 приведены расчетные характеристики вращающих моментов и пусковых токов для одного из АД.

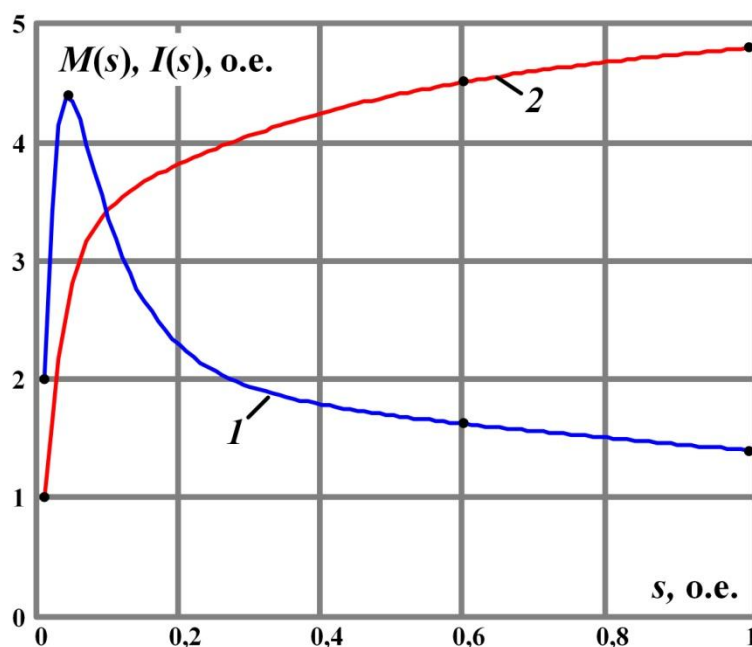


Рис. 7. Расчетные пусковые характеристики АД привода ПЭН блока 300 МВт

Библиографический список

1. **Мыльников, А.** Как я выбрал САПР // САПР-журнал: статьи, уроки и материалы для специалистов области САПР, 2014. [Электронный ресурс] – URL: <http://sapr-journal.ru/stati/kak-ya-vybiral-sapr/>
2. **Павлюков, В. А.** Учебная САПР электрической части станций и подстанций: учеб. пособие] / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко, А. В. Коваленко. – Харьков: ФЛП А.Н. Панов, 2016. – 124 с.
3. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. Термины и определения. – Введ. 01.01.1986. – М.: Стандартиформ, 2005. – 8 с.
4. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – Введ. 30.06.1999. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 12 с.
5. Короткие замыкания и выбор электрооборудования : учеб. пособие для вузов / И. П. Крючков [и др.] ; под ред.: И. П. Крючкова, В. А. Старшинова. – М.: МЭИ, 2012. – 568 с.

УДК 621.315.1

А.В. Проничев, Е.О. Солдусова, Е.М. Шишков**РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАЗОМКНУТОЙ ВОЗДУШНОЙ
ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Самарский государственный технический университет

Для целей организации продольной компенсации в предыдущих работах авторов предложен способ использования собственной распределенной ёмкости. Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи применялись методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScapeSimPowerSystems. Составлена математическая модель для анализа режимов нагрузки и холостого хода разомкнутой линии. Проведён расчёт значений передаваемой мощности, соответствующих различным параметрам: максимально допустимому отклонению напряжения, длительно допустимому току, статической устойчивости. Проведен анализ режимов нагрузки трехфазной разомкнутой ВЛЭП.

For the purpose of organizing longitudinal compensation in previous works of the authors, a method of using its own distributed capacitance is proposed. To analyze the effectiveness of the application of open power transmission lines, mathematical modeling methods were used in the MATLAB / Simulink environment using the SimScapeSimPowerSystems element library. A mathematical model is developed for the analysis of load conditions and idling of an open line. The calculation of the transmitted power values corresponding to various parameters is carried out: the maximum-permissible voltage deviation, the long-allowable current, and the static stability. Analyzed the load conditions of a three-phase open high-voltage line.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, продольная компенсация, самокомпенсированная линия.

Key word: electrical transmission line, longitudinal compensation, self-compensated line.

Введение

Установки продольной компенсации являются неотъемлемым элементов сверхдальних передач переменного тока [1]. Одним из способов достижения цели продольной компенсации – уменьшения продольной индуктивности воздушной линии (ВЛ) – служит настройка линии на резонанс напряжений или резонанс токов. Эта идея была предложена в работах И .И. Соловьёва и А .А. Вульфа [2] в первой половине XX в. Позднее профессором Н.Ф. Ракушевым в работе [3] был предложен способ реализации данной идеи – разомкнутая линия электропередачи, каждая фаза которой состоит из двух изолированных друг от друга проводников, один из которых (прямая составляющая) подключен к шинам передающей подстанции, а второй (встречная составляющая) – к шинам приёмной. При достаточной длине линии взаимная емкостная проводимость,

созданная между прямой и обратной составляющими, могла бы полностью скомпенсировать собственную индуктивность линии.

В работе [4] авторами предложена усовершенствованная конструкция разомкнутой ВЛ, выполненная по принципу расщепления фазы. В такой линии прямая и встречная составляющие расщеплённой фазы подвешены на одной траверсе и отделены друг от друга диэлектрическими распорками. При этом на одной опоре могут располагаться все три фазы разомкнутой ВЛ. В работе [5] авторами предложена математическая модель в фазных координатах, учитывающая принципиальную несимметрию разомкнутой ВЛ, как трёхфазной системы, а в работе [6] – способ реализации этой модели в виде методик расчёта установившегося режима линии.

В работе [7] рассматривался вопрос определения оптимальной конструкции расщепленной фазы разомкнутой воздушной линии, однако расчеты производились на однофазной модели.

Целью данного исследования является расчет и анализ режимов нагрузки предложенной в [4] конструкции трехфазной разомкнутой ВЛ.

Результаты

С учётом полученных ранее результатов анализа установившихся режимов РВЛ [8] в настоящей работе проведена оценка предела передаваемой мощности для разомкнутой линии. Для этого модель общего участка линии представлена в виде четырёх последовательно соединённых блоков многопроводной схемы замещения, каждый из которых моделирует участок равной длины (рис. 1).

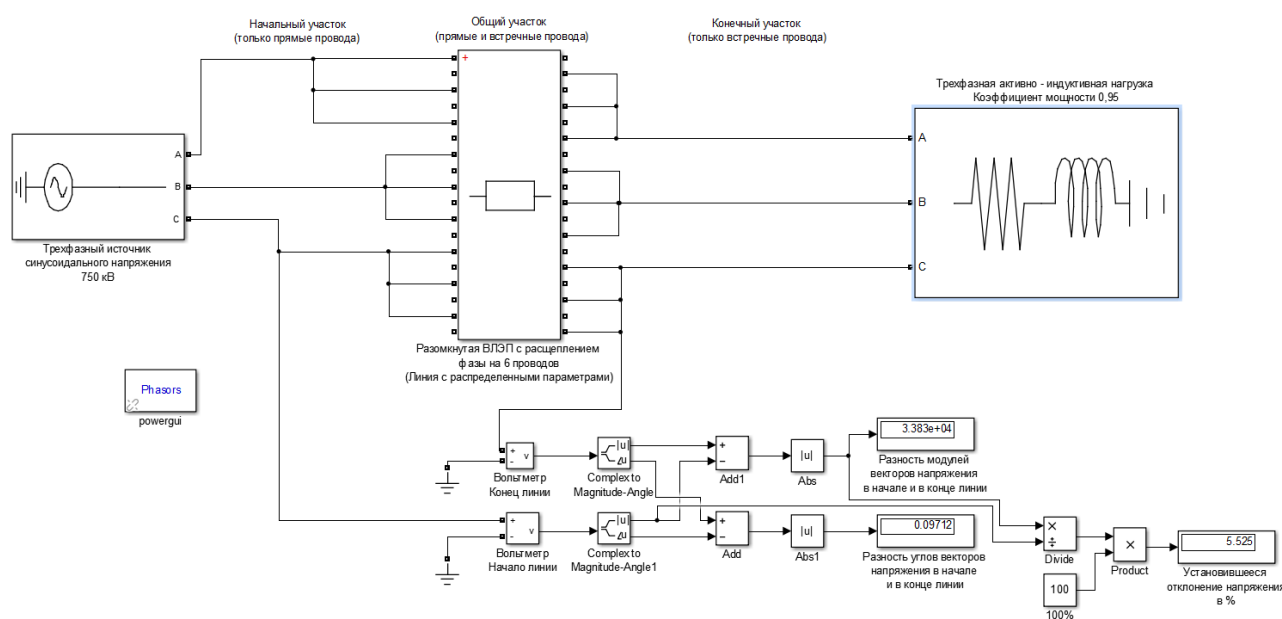


Рис. 1. Математическая модель разомкнутой ВЛЭП в среде Matlab/Simulink

С использованием данной модели: проведена оценка градиента напряжения вдоль линии; рассчитана зависимость установившегося отклонения напряжения от величины передаваемой мощности; выполнена оценка предела статической устойчивости линии.

Ввиду бесконечно малого значения продольного индуктивного сопротивления разомкнутой линии предел передаваемой мощности по статической устойчивости оказался значительно выше, чем у воздушных линий стандартной конструкции.

Для разомкнутой линии напряжением 500 кВ с фазой, расщеплённой на два провода АС-700, пропускная способность будет ограничена величиной длительно допустимого тока фазных проводников (рис. 2). Максимально допустимые значения передаваемой мощности, определяемые всеми прочими условиями работы линий, оказываются существенно выше традиционных неразомкнутых линий соответствующей длины.

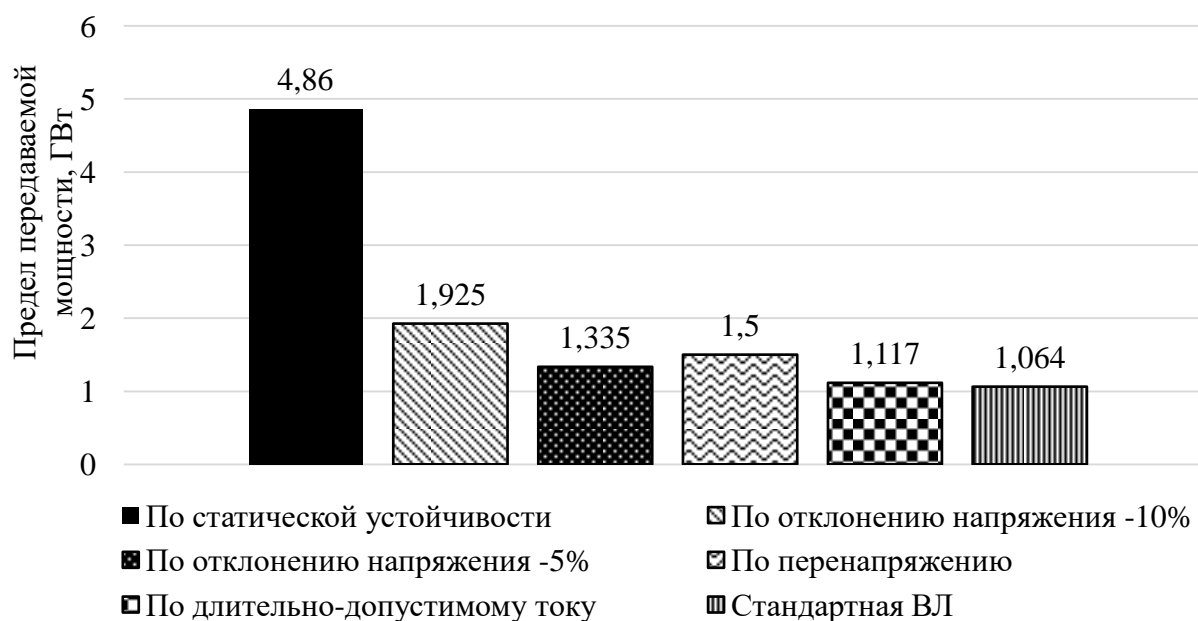


Рис. 2. Предел передаваемой мощности для РВЛ 500 кВ с расщеплением на два провода

С учётом полученных результатов в послеаварийных режимах работы разомкнутые линии позволяют обеспечивать увеличение предела передаваемой мощности не менее 40% по сравнению с традиционными линиями.

Схожие результаты получены при моделировании линии 500 кВ с фазой 4хАС-700 (рис. 3).

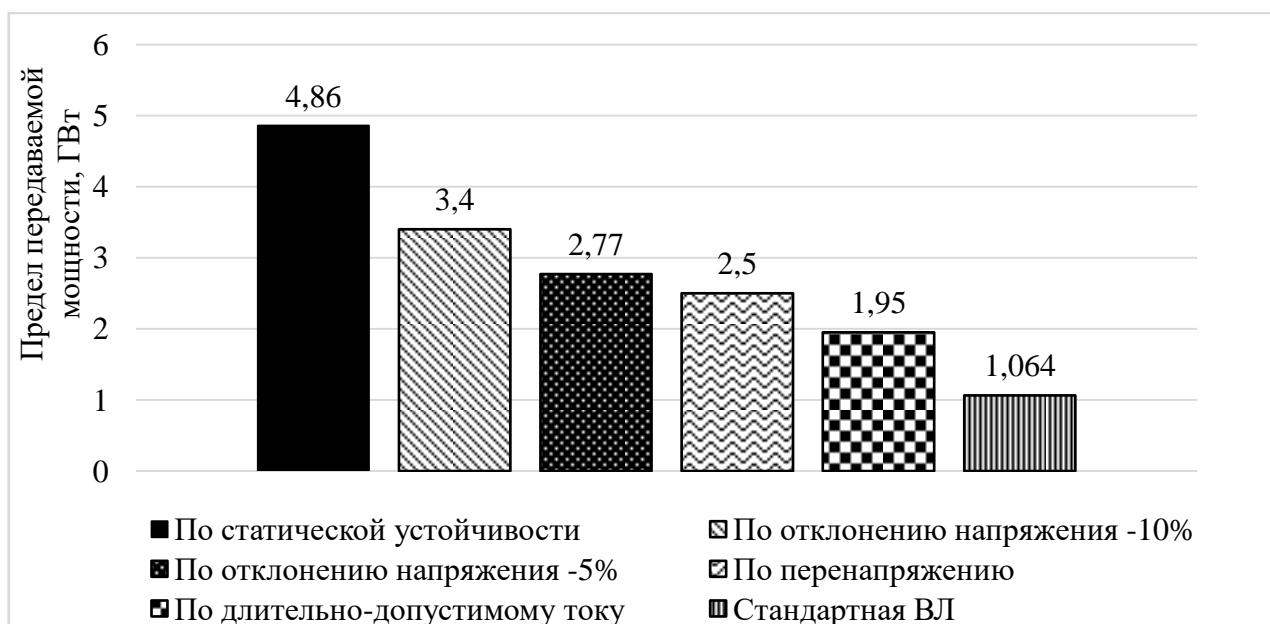


Рис. 3. Предел передаваемой мощности для РВЛ 500 кВ с расщеплением на четыре провода

Для указанной конфигурации линии определяющим также является ограничение по длительно допустимому току.

Аналогичные расчёты проведены для линии 750 кВ с четырьмя проводами (рис. 4) в фазе и с шестью проводами в фазе (рис. 5).

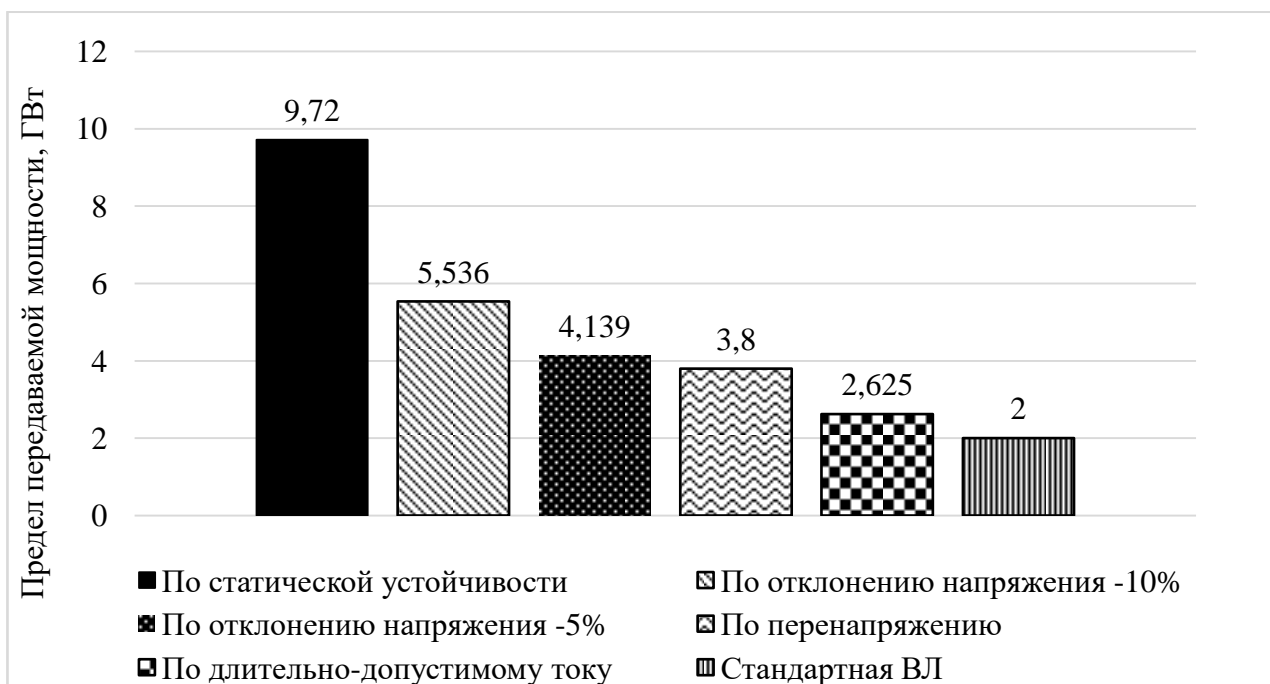


Рис. 4. Предел передаваемой мощности для РВЛ 750 кВ с расщеплением на четыре провода

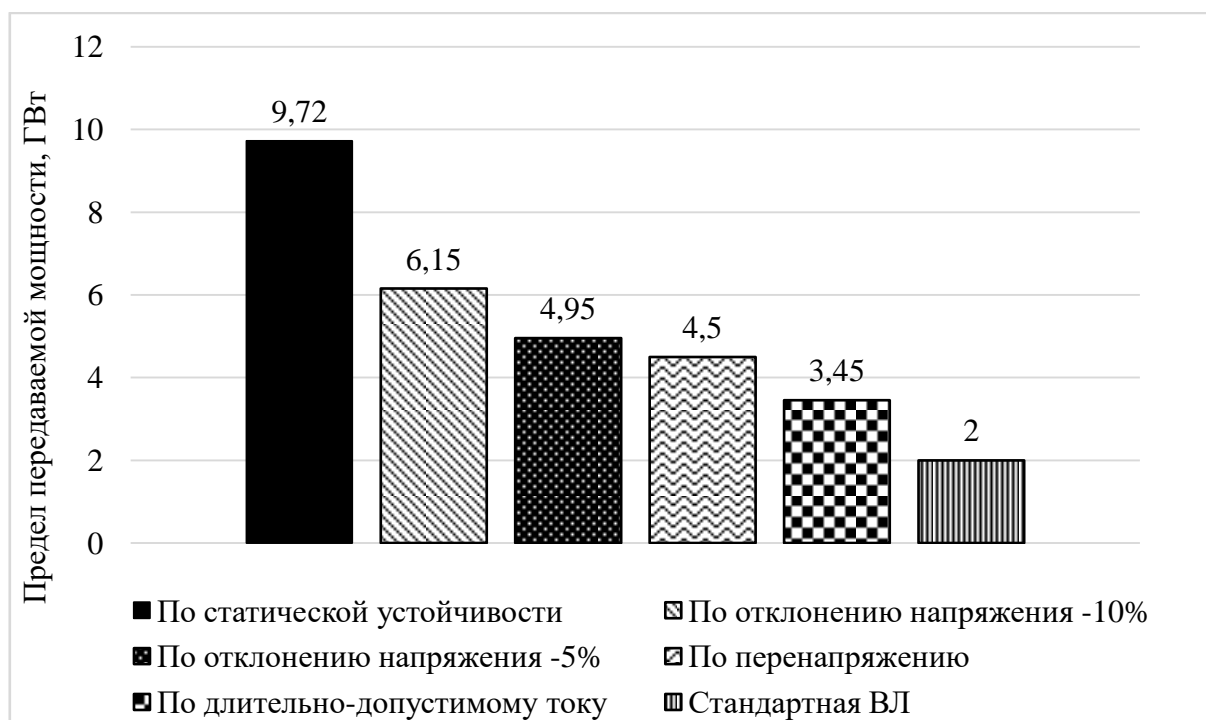


Рис. 5. Предел передаваемой мощности для РВЛ 750 кВ с расщеплением на шесть проводов

Выводы

Результаты выполненного в работе анализа условий, ограничивающих предел передаваемой мощности разомкнутой линии, позволяют утверждать, что для таких линий главным ограничивающим фактором является величина длительно допустимого тока проводника расщеплённой фазы. Ограничения пропускной способности по условию статической устойчивости для РВЛ превышают соответствующие значения для традиционной конструкции ВЛ в 4 - 5 раз. В послеаварийных режимах РВЛ обеспечивают не менее 40% большую пропускную способность, чем традиционные.

Библиографический список

1. Готман, В. И. Продольная компенсация дальних электропередач с промежуточными системами / В. И. Готман, А. В. Глазачев, Н. В. Бацева // Известия ТПУ. – 2011. Т. 31. № 4. – С. 68-75.
2. Вульф, А. А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям / А. А. Вульф. – М.: Госэнергоиздат, 1945. – 83 с.
3. Ракушев, Н. Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям / Н. Ф. Ракушев. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 160 с.
4. Пат. 130458 РФ, МПК8 Н 02 J 3/20. Разомкнутая трёхфазная воздушная линия электропередачи переменного тока / В.Г. Гольдштейн, Е.М. Шишков // СГТУ, № 2013103649/07; заявл. 28.01.2013; опубл. 20.07.2013. Бюл. №20.
5. Шишков, Е. М. Математическая модель самокомпенсированной воздушной линии и электропередачи. // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. докл. VI Междунар.

- научно-технич. конф. – Иваново. – 2015. – С. 620 - 623.
6. **Shishkov, E.** Open Overhead Transmission Lines / E/ Shishkov, V. Goldstein, I. Krivihin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 792. P. 293 – 299.
 7. Определение оптимальной конфигурации расщепленной фазы для самокомпенсированных разомкнутых линий электропередачи / А. В. Проничев [и др.] // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VII Междунар. научно-технич. конф., 19 – 23 сентября 2016 : В 3 т. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. Т. 1. – С. 198 - 201.
 8. **Проничев, А. В.** Оценка предела передаваемой мощности разомкнутой воздушной линии электропередачи /А. В. Проничев, Е. О. Солдусова, Е. М. Шишков // Вестник СГТУ. Сер. Технические науки. – 2017. – №2 (54). – С. 139 - 145.

УДК 621.311

В.В. Сенько, Г.Р. Самойленко**ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ СЛОЖНЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Самарский государственный технический университет

Рассматриваются вопросы оценки допустимых режимов сложных электроэнергетических систем. Анализируются различные подходы к оценке допустимых режимов систем. Для расчета допустимых по условиям статической аperiodической устойчивости предлагается использовать обобщенные уравнения предельных режимов, основанные на разработанных методах расчета и описания режимов электроэнергетических систем и методах определения допустимых режимов.

The article deals with the evaluation of permissible modes of complex electric power systems. Different approaches to the assessment of permissible modes of systems are analyzed. To calculate the permissible under the conditions of static aperiodic stability, it is proposed to use the generalized equations of limit regimes, based on the developed methods for calculating and describing the modes of electric power systems and methods for determining the permissible regimes.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, предельные режимы.

Key words: electric power systems, limiting modes.

При управлении сложными электроэнергетическими системами (ЭЭС) весьма актуальна информация о принадлежности параметров текущего режима допустимой области по условиям статической устойчивости. Одним из определяющих критериев для построения этой области является требуемая (нормированная) величина запаса статической аperiodической устойчивости [1]. Обеспечение этой величины - необходимое условие надежности сложных ЭЭС. Задача расчета допустимого по условиям режима представляет интерес в случаях, когда из-за отсутствия достаточных диапазонов изменения режимов трудно определить режим, одновременно удовлетворяющий всем ограничениям, так как они могут оказаться противоречивыми.

Задача определения режима, отвечающего требуемому запасу статической устойчивости, может быть формализована следующим образом [2, 3]. В начале предполагается, что уравнения установившегося режима представимы в явном виде, то есть $F(X, Y) = Y_0 - Y(X)$, заданы точка исходного режима $\bar{Y}_0 = \bar{Y}(X_0)$, $\bar{Y} = MY$ и направление утяжеления $\Delta \bar{Y}$.

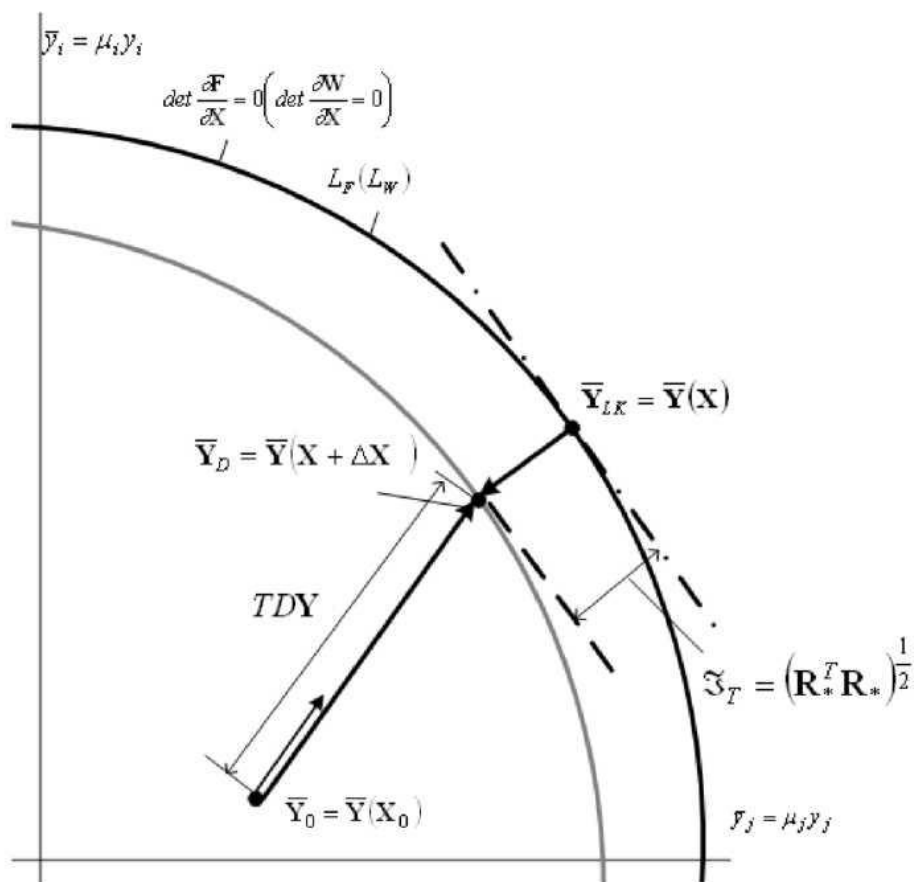


Рис. 1. К определению допустимого режима

Необходимо найти точку $\bar{Y}_D = \bar{Y}(X + \Delta X)$, отвечающую границе области допустимых режимов. Этой точке соответствуют параметры $\bar{Y}_L = \bar{Y}(X)$ гиперповерхности предельных режимов L_F .

В такой постановке параметры X , Y_L , $X + \Delta X$, Y_D могут быть определены из решения системы уравнений [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_0 + T\Delta\bar{Y} - \bar{Y}(X + \Delta X) &= 0; \\ \left(\frac{\partial F}{\partial X}\right)^T R_* &= 0; \\ \bar{Y}(X + \Delta X) - \bar{Y}(X) - R_* &= 0, \\ R_*^T R_* - \xi_T^2 &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

Для расчета допустимых по условиям САУ режимов энергосистемы в работе [5] предложено использовать обобщенные уравнения предельных режимов (ОУПР):

$$\left. \begin{aligned} F \left[X, Y_0 + T\Delta Y - M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right)^T R \right] &= 0; \\ V(X, R) &= \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right)^T R = 0; \\ W(R, T) &= R^T \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right) M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right)^T R - \lambda^2 = 0, \end{aligned} \right\} (2)$$

где $M = \text{diag} \mu_i$.

Расчет произведен для консервативной трехузловой модели энергосистемы, представленной на рис. 2.

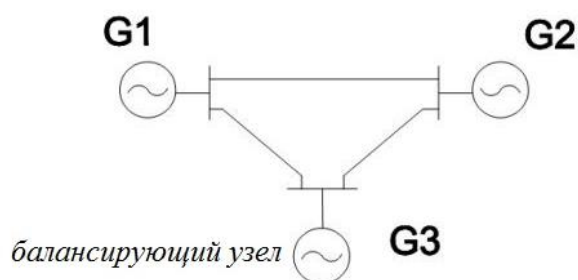


Рис. 2. Трехузловая модель энергосистемы

При расчете запасов устойчивости система ОУПР [2], наряду с нетривиальными решениями $X_{\text{ПР}}^*$, отвечающим точкам гиперповерхности L_Y , имеет тривиальные решения, соответствующие исходному режиму. По этой причине надежное решение систем ОУПР потребовало создания стартовых алгоритмов, позволяющих избежать указанные затруднения. Были проведены вычислительные эксперименты с применением методики, основанной на введении фиктивной переменной α в систему уравнений (2).

Расчеты проводились для различных направлений утяжеления. Результаты расчетов сведены в табл. 1. Они показывают, что искомые допустимые точки $Y_{\text{дi}}$ и соответствующие им точки предельной поверхности $Y_{\text{прi}}$ можно надежно определить за 6 - 8 итераций системы ОУПР. В ходе расчетов также было произведено уточнение параметра T и вектора $Y = Y_0 + T\Delta Y - M^2 R$ (рис. 3).

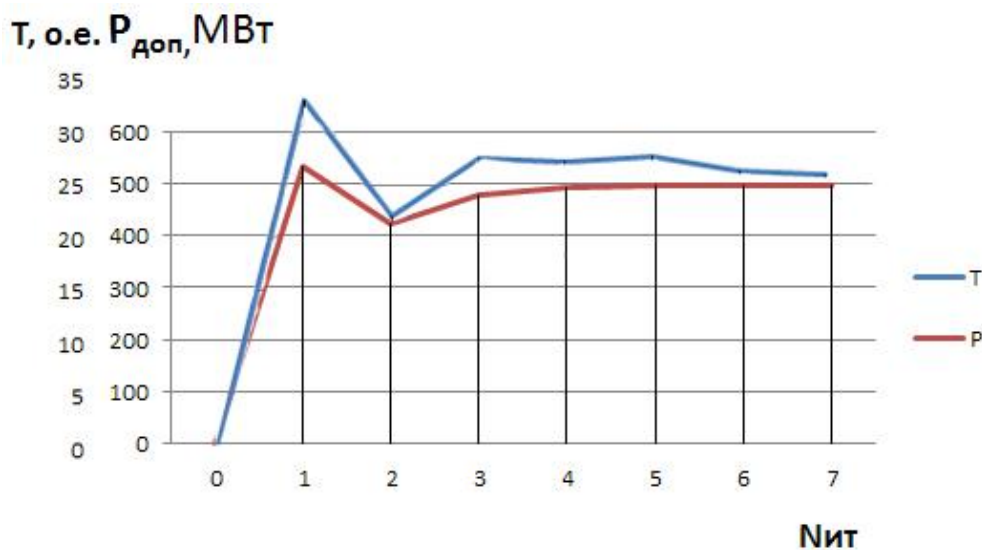


Рис. 3. Изменение параметра T и величины вектора $Y_0 + T\Delta Y - M^2 R$ на итерациях при решении системы уравнений

Таблица 1

Обобщенные результаты расчетов допустимых режимов

N п/п	Напряжение утяжеления	Параметры предельных и допустимых режимов				Коэффициент запаса
	$\Delta P_1 / \Delta P_2$	$P_{1пр} / P_{1доп}$	$P_{2пр} / P_{2доп}$	$\delta_{1пр} / \delta_{1доп}$	$\delta_{2пр} / \delta_{2доп}$	$K_{ин}$
	МВт	МВт	МВт	град	град	о.е.
1	0/10	238,4	828,9	77,0	96,9	0,2
		200,0	782,0	56,0	73,3	
2	10/2	703,6	323,8	108,9	71,9	0,2
		653,5	290,7	81,0	53,0	
3	10/10	540,3	534,8	98,2	73,1	0,2
		496,3	496,3	84,1	62,8	

Выводы

1. Показано, что на основе обобщенных уравнений предельных режимов может быть реализована эффективная методика оценки допустимых режимов энергосистем, отвечающих требуемой величине запаса статической устойчивости. С помощью экспериментальных исследований выявлено, что указанная методика применима также для ввода режимов в допустимую область по заданным траекториям изменения регулируемых параметров.

2. Проведенные исследования сходимости и неоднозначности вычислительных процессов при решении ОУПР показали, что предложенные алгоритмы применимы в задачах планирования и оперативного управления сложными ЭЭС. Для увеличения надежности сходимости численных методов решения рассмотренных уравнений к искомому решению необходимо использовать специальные стартовые алгоритмы.

Библиографический список

1. **Лукашов, Э. С.** Введение в теорию электрических систем / Э. С. Лукашов. – Новосибирск: Наука, 1981.
2. **Крюков, А. В.** Оценка запасов устойчивости и определение допустимых режимов энергосистем / А. В. Крюков, В. В. Давыдов, В. Е. Сактоев. – Иркутск: ИГУ, 1988. Деп. в Информэнерго. № 3002-эн88.
3. **Крюков, А. В.** Предельные режимы электроэнергетических систем / А. В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС. – 2012. – 236 с.
4. **Крюков, А. В.** К определению понятия запаса апериодической устойчивости при многокоординатных утяжелениях режима энергосистемы / А. В. Крюков [и др.] // Труды НИИПТ, 1990. N 2.
5. **Крюков, А. В.** Математические модели предельных режимов сложных энергосистем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2004. – №1. – С. 97 – 103.
6. **Крюков, А. В.** Математические модели предельных и допустимых режимов сложных энергосистем энергосистемами / А. В. Крюков. – Изд. Вост.-Сиб. технолог. ин-та, 1992.
7. **Крюков, А. В.** Обобщенные уравнения предельных режимов и их использование в задачах управления энергосистемами / А. В. Крюков, В. В. Сенько. – СПб.: Ленингр. гос. Техн. ун-т. 1992. 59 с. Деп. в Информэнерго. 18.08.92 № 3352-эн92.
8. **Маркович, И. Н.** О критерии статической устойчивости, базирующемся на сходимости итерационного процесса установления исследуемого режима / И.Н. Маркович, В.А. Баринов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – №5.
9. **Чемборисова, Н. Ш.** Приближенные методы оценки предельных по статической устойчивости режимов. Проблемы обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергообъединений / Н. Ш. Чемборисова, Т. Х. Насыров. – СПб, 1994.
10. **Веников, В. А.** Электрические системы / В. А. Веников. – М.: Высш.шк., 1982.

УДК 621.311

Е.О. Солдусова, А.В. Проничев, Е.М. Шишков**СНИЖЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ РЕЗЕРВОВ МОЩНОСТИ В
ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Самарский государственный технический университет

В работе проведено математическое моделирование и расчет электрических режимов микрогрида в RastrWin3 с целью учета потерь в электроэнергетической системе. В процессе моделирования была получена зависимость мощности на балансирующем узле от количества узлов нагрузки для разного отношения собственной генерации к потреблению. Также было проведено экономическое обоснование работы собственных источников энергии в узлах микрогрида.

In the work, mathematical modeling and calculation of the microgrid electric modes in RastrWin3 were carried out to take into account losses in the electric power system. In the course of the simulation, the power on the balancing node was calculated from the number of load nodes for a different ratio of the generation to the consumption. Also, the economic justification of the work of its own energy sources in the microgrid nodes was carried out.

Ключевые слова: Blockchain, микрогрид, солнечная энергетика, распределенная генерация.

Key words: Blockchain, microgrid, photovoltaics, distributed generation.

Современная электроэнергетика – одна из самых наукоёмких и технологичных отраслей промышленности. Одним из перспективных направлений для поиска решений задач управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в электроэнергетических системах является применение технологий распределённого реестра – Blockchain, что обусловлено повышением доступности возобновляемых источников энергии, объединяемых в системы с распределённой генерацией [1].

В данной работе предлагается использование автоматического устройства, реализующего технологию Blockchain, для учёта переданной и потреблённой в каждом узле сети электроэнергии посредством системы самоисполняемых контрактов, а также осуществляющего функции автоматизированного управления режимами микрогрида.

Целью настоящей работы является обоснование и реализация принципов управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в микрогридах с помощью автоматического устройства, реализующего технологию Blockchain. Управление режимом в данном случае направлено на сокращение необходимых резервов мощности с учётом требуемого уровня надёжности электроснабжения

и качества электроэнергии. При этом рыночный механизм в рамках микросети организован на основе подходов [2, 3].

Анализ режимов работы микрогрида

Расчет режима работы рассматриваемой системы был произведен в программе RastrWin3 с целью учета потерь в электроэнергетической системе.

Схема электроснабжения 0,4 кВ состоит из 20 узлов нагрузки и одного балансирующего узла. Каждый узел – это дом с собственной генерацией в виде небольшой солнечной электростанции в комбинации с аккумуляторными батареями. Активная нагрузка каждого дома (узла) 5 кВт, коэффициент мощности 0,95. В качестве балансирующего узла в реальной системе может выступать вторичная обмотка трансформатора 6(10)/0,4 кВ либо дизель-генераторная установка (ДГУ).

На рис. 1 представлен алгоритм управления изолированной энергосистемой. После подачи сигнала о введении в работу на головное устройство, в системе начинается непрерывный расчет и запись баланса активной мощности в энергосистеме с дискретностью 1 с. В случае соблюдения баланса мощности или незначительном превышении генерируемой $\Sigma P_{ик}$ над потребляемой мощностью $\Sigma P_{нк}$ соответствующий сигнал подается на каждое ведомое устройство в сети. В ведомом устройстве пользователя ведется расчет локального баланса активной мощности, от которого зависит дальнейший учет балансов пользователя в реальной и внутренней валютах.

Если в доме k -го пользователя сети имеется избыток по генерируемой активной мощности $P_{ик}$, то он выдает ее в сеть микрогрида. При этом ведомое устройство, выступая в качестве счетчика электроэнергии, ведет запись выданной в сеть микрогрида электроэнергии E_{vk} . Эта энергия продается в сеть по тарифу во внутренней валюте α , тем самым пополняя соответствующий баланс пользователя A_k . В случае дефицита активной мощности у k -го пользователя энергия E_{dk} потребляется из сети, уменьшая пропорционально тарифу во внутренней валюте α соответствующий баланс пользователя.

Рассмотрим такую ситуацию, когда собственной электроэнергии в микрогриде не хватает – потребляемая мощность $\Sigma P_{пк}$ превышает генерируемую $\Sigma P_{ик}$. В этой ситуации по сигналу головного устройства происходит автоматический ввод резерва на заданную им мощность. Сигнал также подается на каждое ведомое устройство сети. Если в таком режиме у k -го пользователя имеется избыток генерируемой активной мощности, он не имеет возможности выдавать ее в сеть. В случае же дефицита активной мощности энергия E_{pk} будет потребляться из резерва, уменьшая баланс пользователя в реальной валюте B_k пропорционально реальному тарифу на электроэнергию β .

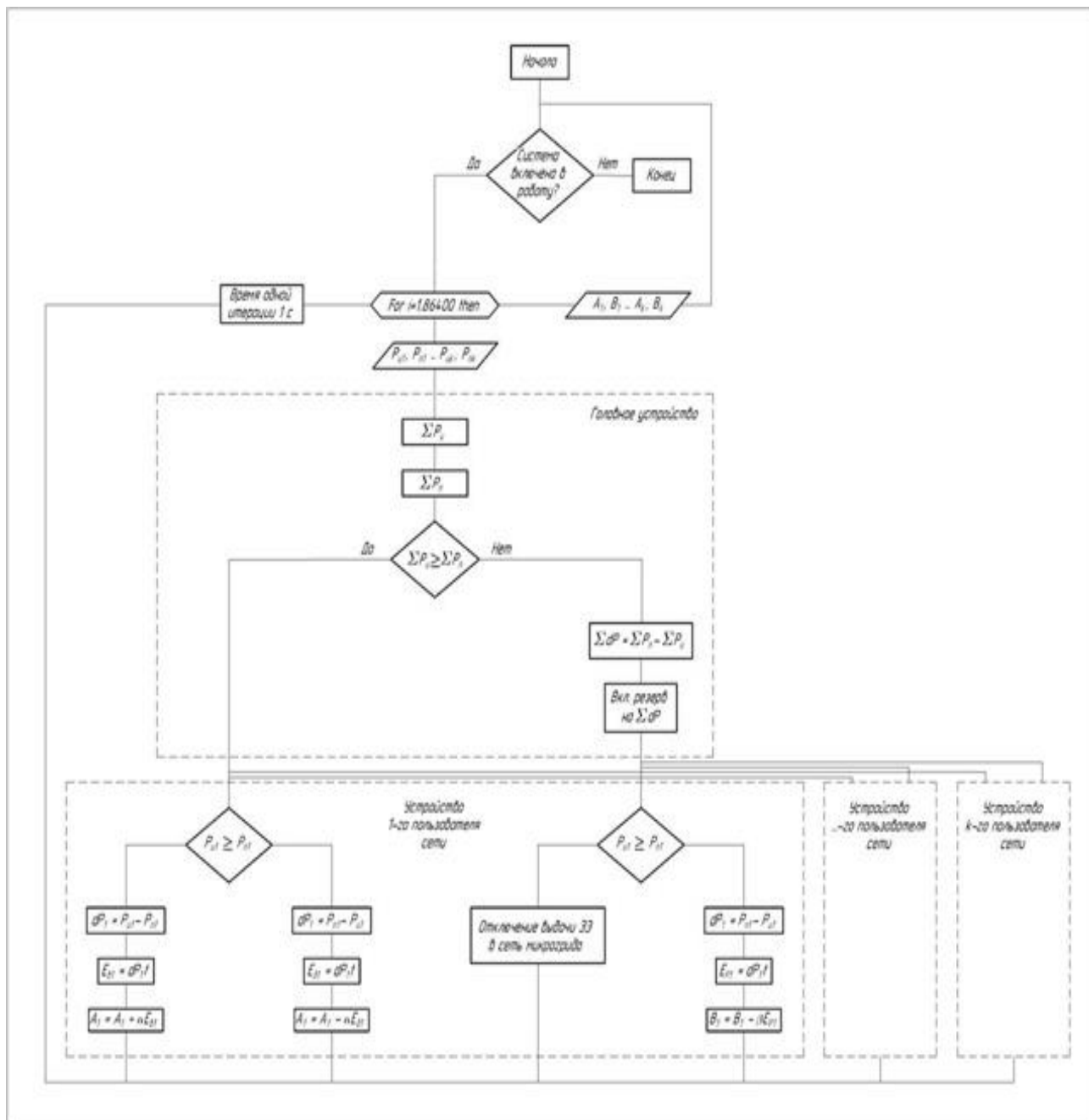


Рис. 1. Алгоритм управления микрогридом

В качестве головного и ведомых устройств в реальной системе планируется использование промышленных программируемых контроллеров, например «ОВЕН».

Для расчетов использовались ПЯТЬ вариантов солнечных электростанций, установленные мощности которых равны: 0,8; 2,4; 3; 3,2; 4 кВт.

В процессе моделирования исследовалась зависимость мощности на балансирующем узле от количества узлов нагрузки для разного отношения собственной генерации к потреблению в узле.

Расчеты показывают (табл. 1, рис. 2), что при увеличении установленной мощности в каждом узле, возможна одновременная работа большего числа узлов без получения электроэнергии из внешней энергосистемы.

При одновременном потреблении меньшего числа узлов электроэнергия будет запасаться в аккумуляторах в каждом узле. Таким образом, при нехватке электроэнергии в системе ее восполнение будет происходить за счет энергии, накопленной внутри системы, а не извне.

Таблица 1

Результаты анализа режимов работы микрогрида

Установленная мощность в узле, кВт	Соотношение выработки и потребления в узле, %	Количество узлов, одновременно находящихся в нагрузке
0,8	16	2
2,4	48	8
3	60	10
3,2	64	11
4	80	14

На рис. 2 результаты расчетов представлены графически.

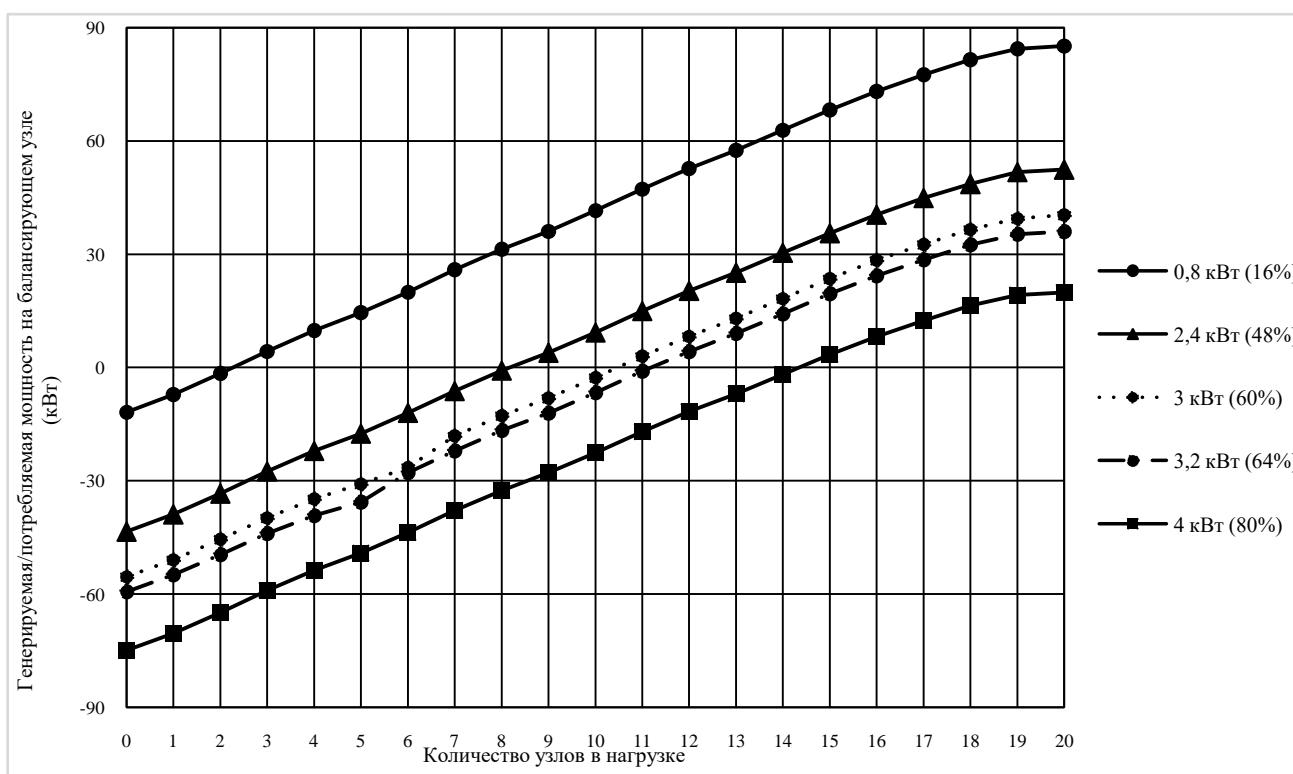


Рис. 2. График зависимости мощности на балансирующем узле от количества узлов в нагрузке

Выводы

Использование распределённой генерации в малых изолированных энергосистемах является экономически оправданным: срок окупаемости устройств распределённой генерации значительно меньше срока их эксплуатации. Для организации взаиморасчётов между собственниками объектов малой генерации в микрогриде возможно применение технологии самоисполняемых контрактов.

Библиографический список

1. **Arnold, G. W.** Challenges and opportunities in smart grid: a position article // Proceedings of the IEEE. – 2011. – V. 99. – N 6. – P. 922 – 927.
2. **Block, C.** A Market Mechanism for Energy Allocation in Micro-CHP Grids / C. Block, D. Neumann, C. Weinhardt // Proceedings of the 41st Hawaii International Conference on System Sciences, 2008. – P. 1 - 11.
3. **Pascual, J.** Energy management strategy for a renewable-based residential microgrid with generation and demand forecasting / J. Pascual [et al.] // Applied Energy. – 2015. – N 158. – P. 12 – 25.

УДК 621.311.153.001.24

В.П. Степанов, Н.В. Безменова, К.С. Зубарева**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ**

Самарский государственный технический университет

Приводится оценка дополнительных расчетных потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях, питающих электродуговые сталеплавильные печи вместимостью от 5 до 200 т. Оценка приведена с учетом коэффициента формы и экспоненциально-косинусной вероятностной взаимосвязью между ординатами резкопеременного графика электрической нагрузки в период расплавления твердой шихты. Показано, что дополнительные потери электроэнергии обусловлены увеличением дисперсной составляющей расчетных потерь электроэнергии и составляют от 6 до 48%. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования методики оценки расчетных потерь электроэнергии.

The article estimates the additional estimated losses of electric power in industrial electric networks feeding electric arc steelmaking furnaces with capacity from 5 to 200 tons. The estimation is given taking into account the form factor and the exponential-cosine probabilistic relationship between the ordinates of the sharply variable graph of electric load during the melting of solid charge. It is shown that additional losses of electric power are caused by an increase in the disperse component of the estimated losses of electricity and make up from 6 to 48%, depending on the type of furnaces. The results of the work can be used to improve the methodology for estimating the estimated losses of electricity.

Ключевые слова: электродуговые сталеплавильные печи, графики электрической нагрузки, коэффициент формы, корреляционная функция, время корреляции, расчетные потери электроэнергии.

Key words: electric arc steelmaking furnaces, electric load schedules, shape factor, correlation function, correlation time, estimated power losses.

В системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий электродуговые сталеплавильные печи (ЭДСП) являются наиболее мощными электроприемниками с единичной мощностью от 0,4 до 200 МВА и напряжением питания 6÷330 кВ [1, 2]. В элементах СЭС, обеспечивающей питание ЭДСП, помимо основных потерь, возникают дополнительные потери электроэнергии (ЭЭ) от отклонений, провалов и колебаний напряжения, несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений [2]. Оценке дополнительных потерь ЭЭ от несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений посвящены работы [2 ÷ 4].

В настоящей работе приводится оценка дополнительных потерь ЭЭ, обусловленных резкопеременным характером графика электрической нагрузки

(ГЭН) ЭДСП с коэффициентом формы $K_\phi > 1,1$ [7]. Это, прежде всего, относится к периоду расплавления твердой шихты, в течение которого резкопеременный характер ГЭН ЭДСП проявляется более интенсивно. Причиной возникновения дополнительных потерь ЭЭ в элементах СЭС с ЭДСП является использование для оценки основных потерь ЭЭ ступенчатых $I_\theta(t)$, а не исходных $I(t)$ ГЭН, согласно выражению [5 ÷ 6]

$$\Delta W = 3I_c^2 K_{\phi\theta}^2 RT_p, \quad (1)$$

где I_c – средняя нагрузка; $K_{\phi\theta}$ – коэффициент формы ступенчатого ГЭН; θ – длительность ступеньки (или интервал ступенчатого осреднения θ ГЭН); R – сопротивление элемента СЭС; T_p – расчетное время.

Используя известное из общей теории электрических нагрузок [7] соотношение

$$K_{\phi\theta}^2 = 1 + DI_\theta/I_c^2, \quad (2)$$

выражение (1) преобразуется к виду

$$\Delta W = 3I_c^2 RT_p + 3DI_\theta RT_p = \Delta W_c + \Delta W_D, \quad (3)$$

в котором ΔW_c и $\Delta W_{D\theta}$ представляют собой составляющие основных потерь ЭЭ от характеристик ступенчатого $I_\theta(t)$ ГЭН: от средней нагрузки I_c и от дисперсии нагрузки DI_θ ступенчатого ГЭН соответственно.

В качестве иллюстрации на рис.1 изображен фрагмент реализации исходного резкопеременного и ступенчатого ГЭН металлургических производств с ЭДСП одной из энергосистем России [8]. Реализации на рис. 1 наглядно свидетельствуют о том, что на каждой ступеньке длительностью $\theta=30$ мин происходит не только уменьшение K_ϕ исходного ГЭН ЭДСП на величину δK_ϕ :

$$\delta K_\phi = K_\phi - K_{\phi\theta}, \quad (4)$$

но и уменьшение дисперсионной составляющей $\Delta W_{D\theta}$ потерь ЭЭ на величину [5]

$$\delta(\Delta W_D) = \frac{\delta K_\phi (2K_\phi - \delta K_\phi)}{K_\phi^2}. \quad (5)$$

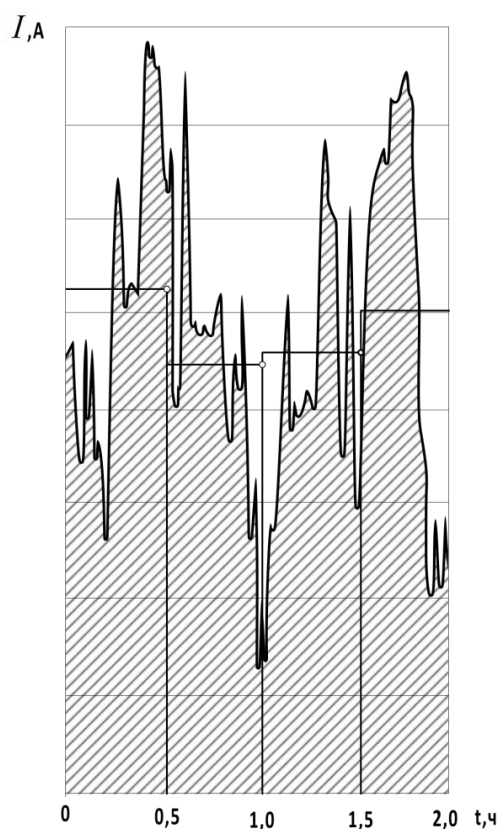


Рис. 1. Фрагмент реализации исходного резкопеременного и ступенчатого графиков электрической нагрузки

Для восстановления K_ϕ исходного ГЭН воспользуемся важнейшей формулой метода вероятностного моделирования [7]

$$DI_\theta = \frac{2}{\theta^2} \int_0^\theta d\tau \int_0^\tau K(\tau) d\tau, \quad (6)$$

которая связывает через корреляционную функцию (КФ) K_τ две дисперсии: исходного DI и дисперсию ступенчатого DI_θ ГЭН.

Результаты опытных и теоретических исследований ГЭН ЭДСП в режиме расплавления, приведенные в [3, 9 ÷ 11], свидетельствуют о том, что вероятностная взаимосвязь между ординатами исходных ГЭН описывается КФ вида

$$K(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau, \quad (7)$$

которое справедливо для всех типов ЭДСП. При этом коэффициент затухания α изменяется в диапазоне от 0,01 до 0,031 м⁻¹, а собственная частота колебания - ω_0 - от 0,019 до 0,07 р/м⁻¹. Поэтому и постоянные времени корреляции T_k , значения которых получены по выражению [12]

$$T_k = \frac{1}{\tau} - \frac{k_{\omega 0}^2}{\alpha(1+k_{\omega 0}^2)} + \frac{2k_{\omega 0}e^{-\pi/2k_{\omega 0}}}{\alpha(1+k_{\omega 0}^2)[1-e^{-\pi/k_{\omega 0}}]}, \quad (8)$$

изменяются в пределах от 20 до 60 мин. При этом коэффициент колебательности $k_{\omega 0} = \omega_0/\alpha$ принимает достаточно устойчивое значение и изменяется в узком пределе от 2 до 2,25. Выражение для K_ϕ ГЭН с КФ вида (7) получается подстановкой DI_θ ступенчатого ГЭН, полученной в [11],

$$DI_\theta = \frac{2DI}{m^2(1+k_{\omega 0}^2)^2} \left\{ m(1+k_{\omega 0}^2) + e^{-m} \left[(1-k_{\omega 0}^2) \cos k_{\omega 0} m - 2k_{\omega 0} \sin k_{\omega 0} m \right] - 1 + k_{\omega 0}^2 \right\} \quad (9)$$

в выражение (2):

$$K_\phi = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{\phi\theta}^2 - 1)(1+k_{\omega 0}^2)^2}{2[(1-k_{\omega 0}^2)e^{-m} \cos k_{\omega 0} m - 2k_{\omega 0}e^{-m} \sin k_{\omega 0} m + m(1+k_{\omega 0}^2) - 1 + k_{\omega 0}^2]}} \quad (10)$$

Результаты расчетов восстановленных K_ϕ исходных ГЭН ЭДСП в период расплавления представлены на рис.2 в виде области значений K_ϕ , ограниченной предельными значениями $K_{\phi\theta 1} = 1,45$; $K_{\phi\theta 2} = 1,2$ и $m = 0,5$ и $m = 1,5$, охватывающие рабочие режимы периода расплавления.

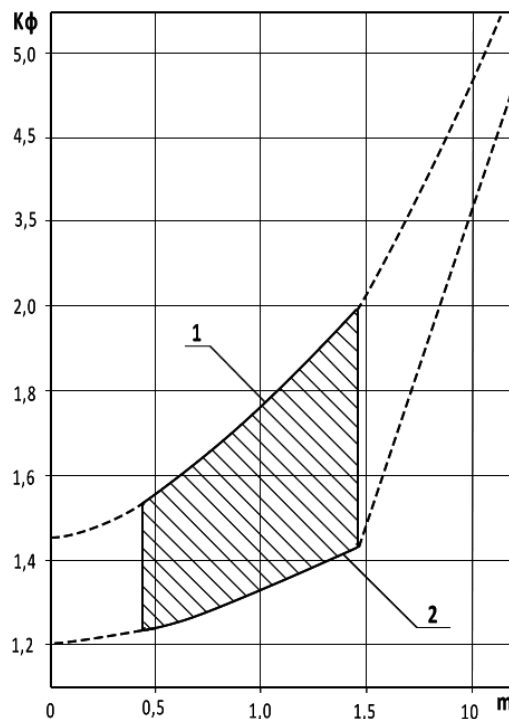


Рис. 2. Зависимость коэффициента формы K_ϕ исходного ГЭН от коэффициента формы $K_{\phi\theta}$ ступенчатого графика и параметра $m = \theta/T_k$:

1 – для графиков $K_{\phi\theta} = 1,45$ и $k_\omega = 2$; 2 – для графиков с $K_{\phi\theta} = 1,2$ и $k_\omega = 2$

Из рис. 2 следует, что максимальное значение K_ϕ достигает диапазона от 0,2 до 0,55.

На рис. 3 изображена кривая изменения дополнительных потерь ЭЭ при увеличении коэффициента формы на величину δK_ϕ , согласно выражению (5) [5].

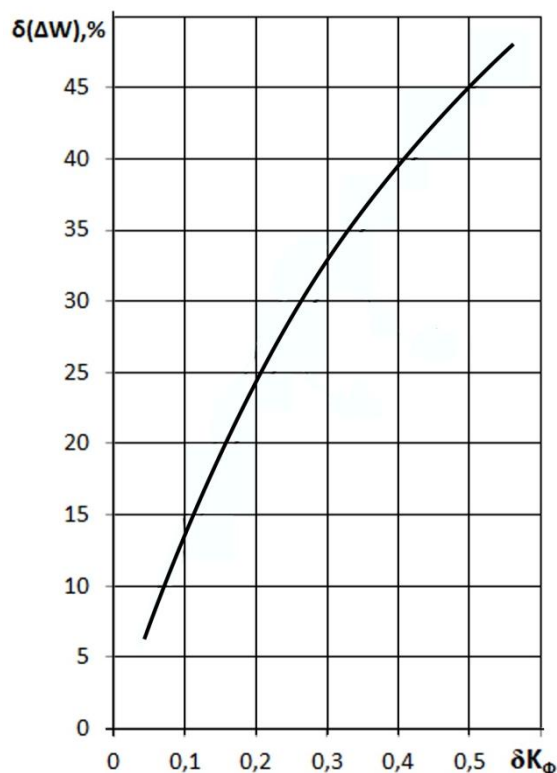


Рис. 3. График зависимости дополнительных потерь ЭЭ от увеличения коэффициента формы графика

Вывод

Дополнительные потери электроэнергии обусловлены увеличением дисперсионной составляющей потерь электроэнергии и не превышают 6 – 48% для печей различной емкости.

Библиографический список

1. **Салтыков, В. М.** Электромагнитная совместимость дуговых сталеплавильных печей с системой электроснабжения / В. М. Салтыков, О. А. Салтыкова, А. В. Салтыков. – Leipzig: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH @ Co.Kg., 2011. – 180 с.
2. **Вагин, Г. Я.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2004. – 258 с.

3. **Вагин, Г. Я.** Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов, С. Н. Юртаев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – №2. – С. 202 – 210.
4. **Жежеленко, И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
5. **Гордеев, В. И.** Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В. И. Гордеев. – М.: Энергоатомизда, 1986. – 184 с.
6. **Железко, Ю. С.** Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко, А. В. Артемьева, О. В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
7. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С. Д. Волобринский [и др.]. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
8. **Ильин, А. В.** Методика учета резкопеременной нагрузки потребителей при выполнении прогноза потребления электроэнергии энергосистемы для целей краткосрочного планирования / А. В. Ильин, И. В. Команова // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. труды Междунар. научно-техн. Конф.: сб. ст.: в 3 т. Самара: СамГТУ, 2017. Т 2. – С. 197 - 200.
9. **Минеев, Р. В.** Графики нагрузок дуговых электропечей / Р. В. Минеев, А. П. Михеев, Ю. Л. Рыжнев. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.
10. **Минеев, Р. В.** Повышение эффективности электроснабжения электропечей / Р. В. Минеев, А. П. Михеев, Ю. Л. Рыжнев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
11. **Жежеленко, И. В.** Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик гарфиков электрической нагрузки потребителей / И. В. Жежеленко, Е. А. Кротков, В. П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 267 с.
12. **Шидловский, А. К.** Введение в статистическую динамику систем электроснабжения / А. К. Шидловский, Э. Г. Куренный. – Киев: Наукова Думка, 1984. – 273 с.

УДК 681.3.06

В.П. Степанов, Н.В. Безменова, К.С. Зубарева**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ В КРУ 6(10) КВ**

Самарский государственный технический университет

Предлагается геометрическая модель, по которой определяются значения напряженностей магнитного поля промышленной частоты в комплектных распределительных устройствах 6(10) кВ.

The paper proposes a geometric model, which determines the values of the magnetic field strengths of the industrial frequency in 6 (10) kV switchgear.

Ключевые слова: магнитное поле промышленной частоты, напряженность, комплектное распределительное устройство, геометрическая модель.

Key words: magnetic field of industrial frequency, tension, complete switchgear, geometric model.

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.

Особенность данной проблемы в обеспечении 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 $H_{\text{норм}} = 100$ А/м, а для ряда ТУ, например, для микропроцессорного устройства дистанционной защиты "Сириус-ДЗ-35", на уровне $H_{\text{норм}} = 30$ 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 [4].

В ячейках КРУ с напряжением 6...10 кВ, как показано на рис. 1, шины с рабочими токами I_A , I_B , I_C , 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 (МППЗ) – 0,4...0,6 м.

Для определения напряженностей МППЗ 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 [5].

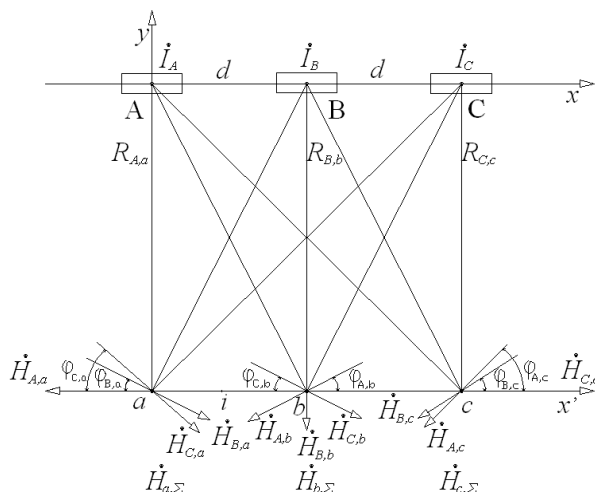


Рис. 1. Геометрическая модель расположения шин, направленных к плоскости контрольных точек a, b, c широкой стороной h

В представленной на рис. 1 геометрической модели шины с рабочими токами расположены по оси x в точках A, B, C 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 (результатирующих) значений напряженностей МППЗ, 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 для определения значений напряженности в контрольной точке i , произвольно расположенной в окружающем пространстве в плоскости y от токов шин прямоугольного сечения по оси их широкой h стороны, можно использовать следующие выражения:

– по оси координаты x

$$\dot{H}_{h,i} = \frac{I \cdot 0,15(\ln L + 3,11)}{2\pi \cdot R^{1,4}_i},$$

– по оси координаты y

$$\dot{H}_{b,i} = \frac{I \cdot 0,12 \cdot (\ln L + 3,29)}{2\pi \cdot R^{1,4}_i},$$

– в плоскости y

$$\dot{H}_{i,эл} = \frac{\dot{H}_{h,i} \cdot \dot{H}_{b,i}}{\sqrt{\dot{H}_{h,i}^2 \cdot \sin^2 \varphi_{h,i} + \dot{H}_{b,i}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{h,i}}},$$

где $H_{h,i}$ - напряженность МППЧ в воздушном пространстве по оси широкой стороны h прямоугольной шины; $H_{b,i}$ - напряженность МППЧ в воздушном пространстве по оси узкой стороны прямоугольной шины; $H_{i,эл}$ - напряженность МППЧ в воздушном пространстве по оси эллипса; I - ток шины (A , B , C) прямоугольного сечения; L - длина прямоугольной шины с током ($L \leq 1,0$ м); R_i - расстояние от центра прямоугольной шины до 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.

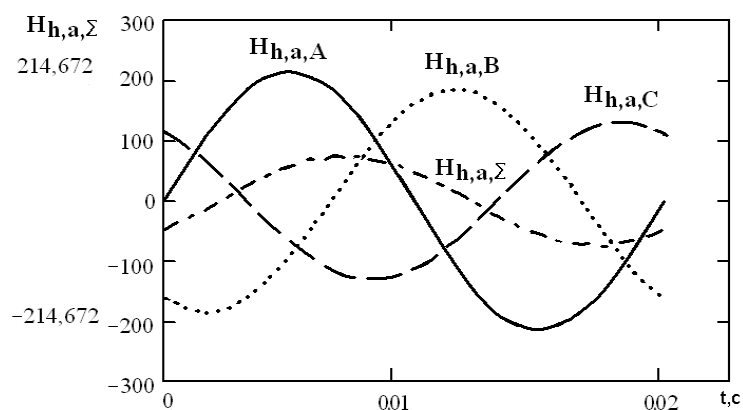


Рис. 2. Осциллограммы напряженностей МППЧ при $R_a = 0,6$ м для токов $I_A=I_B=I_C=1000$ А

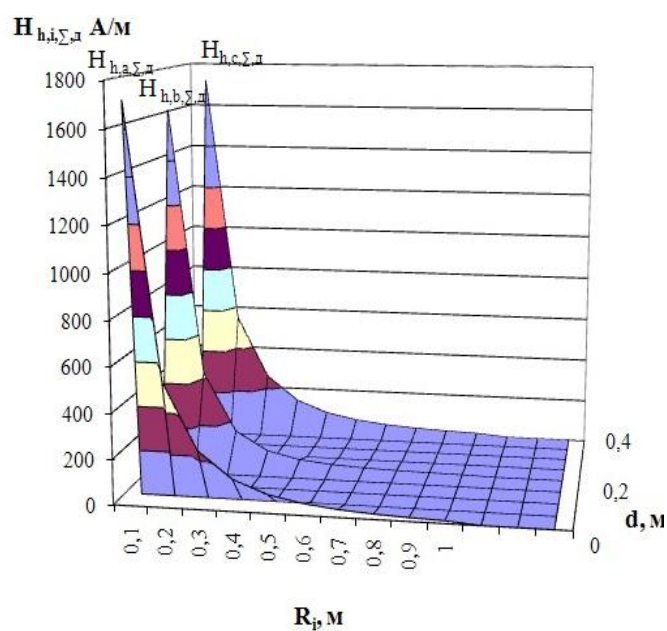


Рис. 3. Графическая модель изменения суммарной напряженности МППЧ от симметричных трехфазных токов прямоугольных шин A, B, C в плоскости их широких сторон

Графическая модель изменения напряженности от трехфазной системы шин с симметричными токами приведена на рис.3. Из рис. 3 и рис. 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.

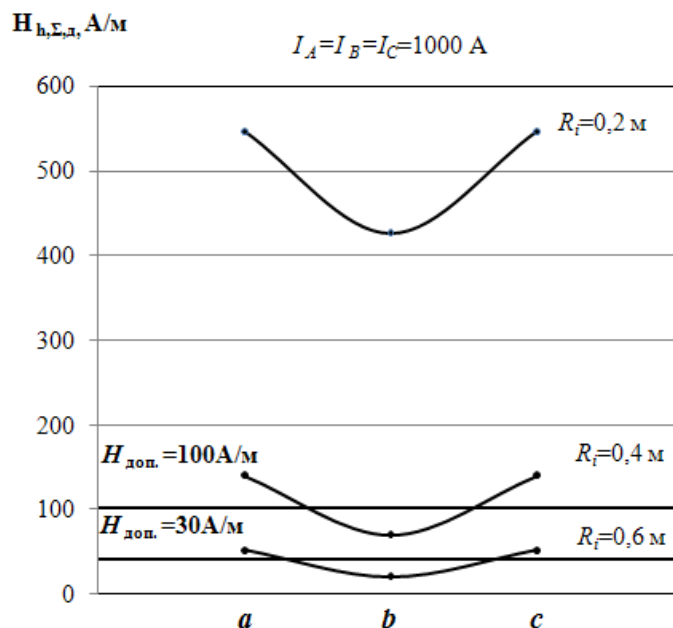


Рис. 4. Характер изменения суммарной напряженности МППЧ от симметричных трехфазных токов прямоугольных шин A, B, C в плоскости их широких сторон h в точках a, b, c при $R_i = 0,2; 0,4; 0,6$ м

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

Совместный анализ напряженности МППЧ от видов проводников трехфазной системы показывает, что наибольшие значения суммарных напряженностей МППЧ в контрольной точке на одинаковом расстоянии от шин присутствуют при направлении шин прямоугольного сечения к плоскости контрольной точки широкой стороной, наименьшие - узкой. Расхождения составляют 35%. Промежуточные значения суммарных напряженностей МППЧ создают шины круглого сечения.

Полученные выражения (1), (2) для определения значений суммарной напряженности МППЧ от трехфазных шин с симметричными токами и с учетом характера их изменения в воздушном пространстве могут быть использованы для оценки ЭМО и условий ЭМС с чувствительными к ним ТС [7]. Условия ЭМС ТС по суммарным значениям напряженностей МППЧ от трехфазных шин с симметричными токами могут быть оценены по табл. 1 величинами допустимых рабочих токов нагрузки для известных между ними расстояний и при отсутствии металлических экранов.

Таблица 1

Условия обеспечения ЭМС ТС по МППЧ от трехфазных шин с симметричными токами с позиции допустимых рабочих токов нагрузки

Условия ЭМС ТС	$H_{50, \text{норм}} \leq 30 \text{ А/м}$			$H_{50, \text{норм}} \leq 100 \text{ А/м}$		
	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Расстояние от шин до ТС $R_{d, \text{доп.}}$, м						
Допустимый рабочий ток (без экрана) $I_{\text{доп.}}$, А	55	216	574	183	712	1894

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. – 2008. – № 5(10). – С. 68 – 71.
4. **Салтыков, В. М.** Условия обеспечения электромагнитной совместимости по магнитным полям промышленной частоты / В. М. Салтыков, Н. В. Сайдова, И. В. Копичникова // Технологии ЭМС. – 2009. – №4. – С. 18 - 22.
5. **Безменова, Н. В.** Электромагнитные поля промышленной частоты в электрических сетях и распределительных установках / Н. В. Безменова, В. М. Салтыков. – М.: Машиностроение, 2011. – 206 с.
6. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. – М.: 2003. – 317 с.
7. **Сайдова, Н. В.** Оценка допустимых расстояний в распределительных устройствах напряжением 6 - 10 кВ при обеспечении нормируемых уровней магнитных полей промышленной частоты 50 Гц / Н. В. Сайдова, Н. В. Безменова // Технологии ЭМС. – №1(36). – 2011. – С. 14 - 18.

УДК 621.311

К.М. Чубаров, Н.В. Сенько**НАХОЖДЕНИЕ ЗАПАСА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЁХУЗЛОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В КРИТИЧЕСКОМ НАПРАВЛЕНИИ УТЯЖЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ**

Самарский государственный технический университет

Предложена методика нахождения запаса статической устойчивости в наиболее критическом направлении утяжеления на основе решения уравнений предельных режимов. Была получена компьютерная модель стартового алгоритма, позволяющего повысить надёжность и быстродействие решений уравнений предельных режимов. Результаты экспериментальных исследований подтверждают практическую ценность разработанной методики.

The article proposed a technique for finding the steady state stability in the most critical direction of weighting margin based on the solution of the equation of limit load operation. A computer model of the starting algorithm was obtained, which makes it possible to increase the reliability and speed of the decisions of the equation of limit load operation. The results of experimental studies confirm the practical value of the developed methodology.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, статическая устойчивость, уравнения предельных режимов, стартовый алгоритм.

Key words: power supply system, steady state stability, generalized equation of limit load operation, starting algorithm.

Проблема управления режимами в нормальных и аварийных ситуациях, задача обеспечения статической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) приобретает в настоящее время особую актуальность и остроту. Указанная проблема отмечается электроэнергетиками многих промышленно развитых стран. Это связано с ухудшением с точки зрения устойчивости параметров элементов и режимных условий электроэнергетических систем ЭЭС по мере их развития и объединения.

Усложнение структуры ЭЭС, увеличение диапазона возможных режимов, нередкое отличие текущих режимов от плановых, необходимость в формировании управляющих воздействий противоаварийной автоматики (ПАА) требуют новых исследований статической устойчивости (СУ). В этой связи разработку обобщенного подхода к решению таких различных задач оценки СУ, как – построение границ области устойчивости (ОУ), оценка запасов в различных направлениях утяжеления, определение допустимых режимов, можно считать актуальной и практически востребованной.

Установившиеся режимы электрических систем описываются нелинейными уравнениями вида

$$F(x, y) = 0, \quad (1)$$

где $x = [x_1 x_2 x_3 \dots x_i]^T$ - вектор нерегулируемых параметров; $y = [y_1 y_2 y_3 \dots y_i]^T$ - вектор регулируемых параметров; F - одномерная вектор-функция, отвечающая уравнениям баланса мощностей или токов в узлах сети.

Широко применяемые методы определения предельных режимов, которые можно назвать методами дискретного утяжеления, включают следующие этапы:

- рассчитывается некоторый заведомо устойчивый режим;
- для этого режима вычисляется значение свободного члена;
- производится изменение регулируемых параметров Y в соответствии с выбранным законом утяжеления.

Запас статической устойчивости представляет собой расстояние (в метрике, задаваемой коэффициентами μ_i) от точки Y_0 до гиперповерхности LW . Задача оценки запаса устойчивости в критическом направлении утяжеления может быть сформулирована следующим образом: определить направление вектора при определённых ограничениях. Для этого используется математическая модель, основанная на модифицированных уравнениях предельных режимов,

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right)^T R = 0, \\ F \left(X, Y_0 - M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T R \right) \end{cases} \quad (2)$$

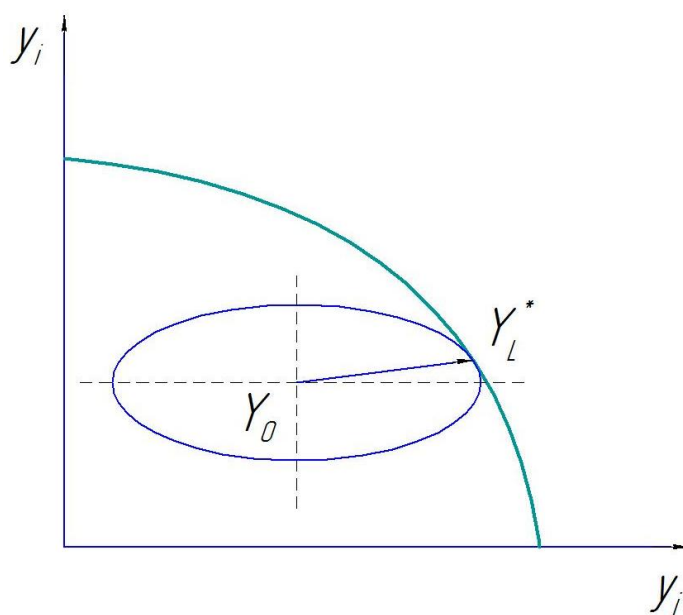


Рис. 1. Геометрическая интерпретация критического направления утяжеления

Отметим, что система (2) имеет размерность, которая превышает размерность уравнений установившихся режимов (УУР), но это не приводит к проблеме для их применения на практике в задачах управления ЭЭС. Это связано со следующими факторами [1]:

1) использование ресурсов современных ЭВМ позволяют решать задачи такого порядка за приемлемое для практических целей время;

2) система (2) является слабозаполненной, поэтому применяются эффективные алгоритмы, заключающиеся в исключении действий с нулевыми элементами. Данные алгоритмы позволяют значительно уменьшить требуемые для этого объемы памяти ЭВМ и повысить быстродействие [2].

В данной работе авторами были проведены исследования СУ с помощью тестовой схемы ЭЭС (рис. 2). Параметры схемы замещения представлены в табл. 1. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность разработанной методики и представлены в табл. 2.

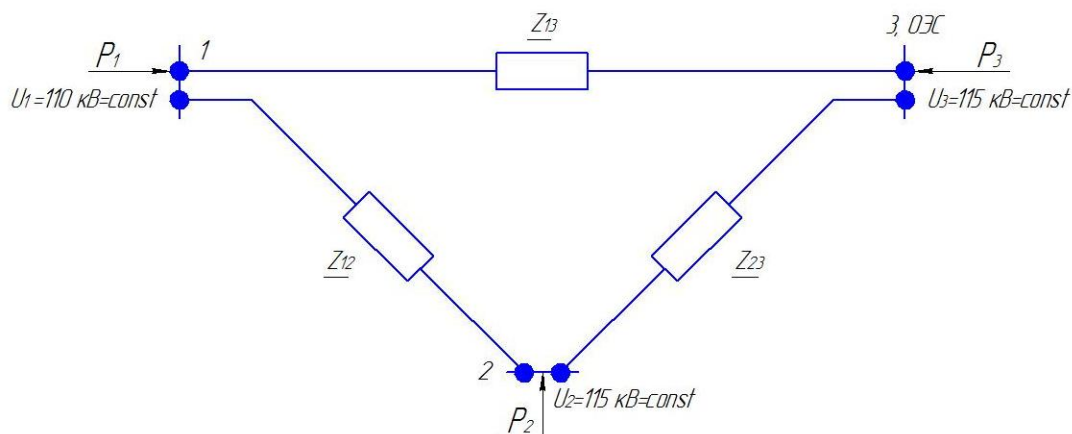


Рис. 2. Упрощённая схема ЭЭС

Таблица 1

Параметры схемы замещения ЭЭС

Z_{12} , Ом	Z_{23} , Ом	Z_{13} , Ом
$0+j25$	$0+j20$	$0+j30$

Таблица 2

Результаты расчёта запаса СУ в критическом направлении утяжеления

Номер расчёта	Кол-во итераций	№ узла	P_0 , МВт	δ_0 , град	$P_{пр}$, МВт	$\delta_{пр}$, град	Запас, %
1	8	1	200	99,7	562,3	99,7	160
		2	200	82,9	509,4	82,9	
2	9	1	600	99,7	731,3	110,4	51
		2	200	82,9	280,4	68,8	
3	9	1	200	99,7	222,1	75,8	28
		2	600	82,9	842,4	97,4	
4	11	1	700	99,7	700	108,7	6,5
		2	300	82,9	329,2	72,3	
5	11	1	-800	99,7	562,3	99,7	110
		2	300	82,9	509,4	82,9	
6	8	1	-350	99,7	657	106,1	238
		2	-350	82,9	390,4	76,2	

По результатам исследования сходимости решения УПР и для их усовершенствования были разработаны стартовые алгоритмы, позволяющие существенно повысить быстродействие и надежность получения нетривиальных решений. На рис. 3 совмещены результаты расчетов запаса статической устойчивости в наиболее критическом направлении утяжеления без стартового алгоритма и расчеты со стартовым алгоритмом, основанным на включении фиктивной переменной α .

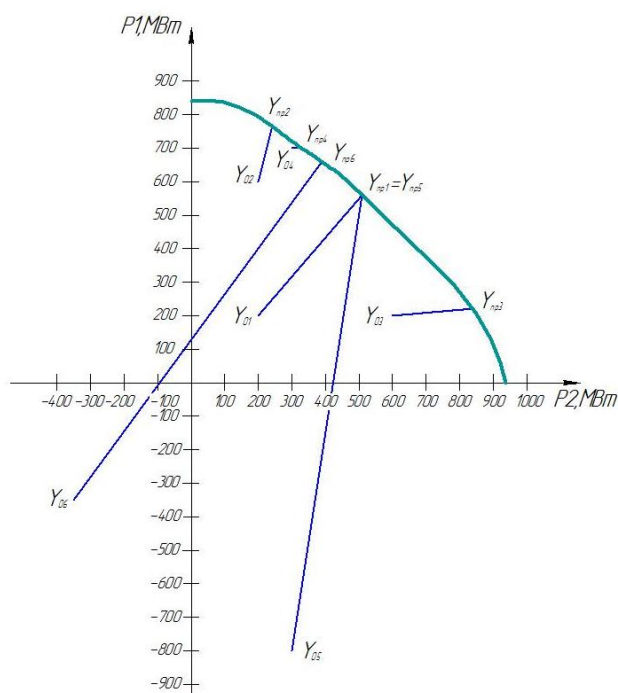


Рис. 3. Результаты расчёта запаса СУ в критическом направлении утяжеления

Применение стартового алгоритма и УПР позволяют существенно снизить количество итераций, тем самым увеличить быстродействие и получать расширенные решения в тех случаях, когда расчет приходил к локальным решениям $u_{лок}$ или тривиальным решениям. Это позволяет повысить надежность предложенных алгоритмов определения запаса в наиболее критическом направлении утяжеления.

Проведенные исследования устойчивости ЭЭС можно эффективно применять в задачах исследования режимов внешнего электроснабжения нефтяной отрасли.

Библиографический список

1. Определение запаса апериодической устойчивости при многокоординатном утяжелении режима энергосистемы / А. В. Крюков [и др.] // Проблемы обеспечения устойчивости и надежности параллельной работы энергообъединений: Сб. научн. тр. НИИПТ, 1993. С. 29 - 39.
2. **Идельчик, В. И.** Расчеты установившихся режимов электрических систем / В. И. Идельчик. – М.: Энергия, 1977. 189 с.
3. **Конторович, А. М.** Предельные режимы энергосистем / А. М. Конторович, А. В. Крюков. – М.: Вост.-Сиб. технол. ин-т, 1985. – 72 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Редактор **Т.В. Третьякова**
Компьютерный набор и вёрстка **Е.Н. Бугрова**

Подписано в печать 2018. Формат 60 x 84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21.0.
Тираж 100 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.