#### ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

На правах рукописи

ny

#### ШАДРИКОВ ТИМОФЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

#### МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И КОМПОНЕНТОВ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Специальность: 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель доктор технических наук, доцент Соколов А.М.

Иваново 2016

### содержание

	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
	ВВЕДЕНИЕ	7
	Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И	
	ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ,	
	КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ	20
1.1.	Конструкция и управление полупроводниковыми	
	преобразователями напряжения, применение в электротехнике и	
	других сферах жизни человека	20
	1.1.1. Конструкция и управление полупроводниковыми	
	преобразователями напряжения	20
	1.1.2. Применение полупроводниковых преобразователей	
	в электротехнике	26
1.2.	Методики расчета силовых высоковольтных трансформаторов	
	повышенной частоты	29
1.3.	Современные разработки силовых кабелей с полимерной изоляцией	33
1.4.	Анализ систем электропитания электротехнологических	
	установок повышенной частоты	41
1.5.	Выводы по главе 1	47
	Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	
	ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОВЫШЕННОЙ	
	ЧАСТОТЫ	49
2.1.	Методика расчета установившихся режимов работы	
	электротехнических комплексов повышенной частоты,	
	содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения	
	с применением частотного анализа	49
2.2.	Методика выбора рабочего напряжения высоковольтной	
	кабельной электропередачи повышенной частоты	62

2.3.	Разработка численно-аналитической методики электротеплового	
	расчета установившихся режимов высоковольтной кабельной	
	электропередачи повышенной частоты	69
2.4.	Разработка методики расчета параметров силовых	
	высоковольтных трансформаторов повышенной частоты	80
	2.4.1. Разработка методики расчета и выбора элементов силовых	
	высоковольтных трансформаторов повышенной частоты	80
	2.4.2. Методика определения емкостных и индуктивных	
	параметров силовых высоковольтных трансформаторов	
	повышенной частоты	89
	2.4.3. Определение параметров схемы замещения силовых	
	высоковольтных трансформаторов повышенной частоты	98
2.5.	Методика оценки показателей энергетической эффективности	
	электротехнических комплексов, содержащих	
	полупроводниковые преобразователи напряжения	
	и высоковольтные кабельные электропередачи	101
2.6.	Выводы по главе 2	104
	Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	
	ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО	
	ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО	
	КОМПЛЕКСА ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	
	ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ	107
3.1.	Исследование характеристик силового оборудования	
	электротехнического комплекса повышенной частоты	107
	3.1.1. Методика экспериментальных исследований силовых	
	высоковольтных трансформаторов повышенной частоты	108
	3.1.2. Результаты исследований характеристик силовых	
	высоковольтных трансформаторов повышенной частоты	111

	3.1.3. Определение емкостных и индуктивных параметров схемы	
	замещения силовых высоковольтных трансформаторов	
	повышенной частоты	118
3.2.	Программная реализация методик расчета установившихся	
	режимов электротехнического комплекса	122
3.3.	Исследование установившихся режимов работы	
	электротехнического комплекса повышенной частоты	133
	3.3.1. Методика проведения экспериментальных исследований	
	электротехнического комплекса повышенной частоты	134
	3.3.2. Результаты исследования работы электротехнического	
	комплекса повышенной частоты в нормальных режимах	140
3.4.	Исследование работы электротехнического комплекса повышенной	
	частоты в режиме холостого хода и короткого замыкания	149
3.5.	Выводы по главе 3	158
	Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК	
	ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОВЫШЕННОЙ	
	ЧАСТОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ	160
4.1.	Определение рабочего напряжения кабельной линии	
	электротехнического комплекса повышенной частоты	160
4.2.	Проведение экспериментальных исследований установившихся	
	режимов работы электротехнического комплекса повышенной	
	частоты в производственных условиях	165
4.3.	Исследование температурных режимов высоковольтной	
	кабельной электропередачи повышенной частоты	175
4.4.	Исследование показателей эффективности	
	электротехнических комплексов повышенной частоты	179
4.5.	Выводы по главе 4	186
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	188
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	192

ПРИЛОЖЕНИЕ А	207
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	213
ПРИЛОЖЕНИЕ В	223
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	227
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	240
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	241
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	242
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	243
ПРИЛОЖЕНИЕ И	244

#### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

IGBT – insulated-gate bipolar transistor (биполярный транзистор с изолированным затвором);

VLF – very low frequency (переменное напряжение сверхнизкой частоты);

БПИ – бумажная пропитанная изоляция;

ЗПТ – звено постоянного тока;

КЗ – короткое замыкание;

КИП – контрольно-измерительная аппаратура;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛАТР – лабораторный автотрансформатор;

МКЭ – метод конечных элементов;

МПЧ – матричные каскадные преобразователи частоты;

МЭК – международная электротехническая комиссия;

НПЧ – непосредственные преобразователи частоты;

ПП – полупроводниковый преобразователь;

ПУЭ – правила устройства электроустановок;

ПЧ – преобразователь частоты;

рис. – рисунок;

СВЧ – сверхвысокая частота;

СПЭ – сшитый полиэтилен;

табл. – таблица;

ТВО – тепловлажностная обработка;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭМО – электромагнитная обстановка;

ЭМС – электромагнитная совместимость;

ЭТКПЧ – электротехнический комплекс повышенной частоты;

ЭТО – электротепловая обработка;

ЭТУ – электротермические установки;

XX – холостой ход;

ЦП – центр питания;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

#### введение

Приоритетным Актуальность темы. направлением государственной политики Российской Федерации является глубокая модернизация экономики с целью значительного повышения эффективности и конкурентоспособности промышленного производства. Ключевыми факторами модернизации являются снижение удельных затрат энергии на выпуск готовой продукции, повышение энергоэффективности и энергосбережения на существующих промышленных предприятиях [1-4, 15, 17-18, 24-31]. Современное промышленное производство характеризуется высокими темпами создания и применения принципиально новых технологических процессов и установок, обеспечивающих комплексный (технический, экономический и социальный) эффект. В сфере электротехники характерным примером является совершенствование известных и развитие новых электротехнологических процессов с применением электрических токов и напряжений непромышленной частоты (современные сварочные и лазерные полупроводниковых преобразователей установки, выполненные на основе напряжения; установки индукционного нагрева, устройства электротепловой обработки (ЭТО) бетонных и железобетонных изделий токами повышенной частоты, обработка пищевых, биологических и композиционных материалов переменными электромагнитными полями и т.д.) [5-11, 20-31, 135, 140, 142, 144]. используются переменные токи и напряжения с частотами, При ЭТОМ достигающими десятков и сотен килогерц, получение которых обеспечивается применением источников питания co встроенными преобразователями напряжения и частоты.

Применяемые настоящее время В схемотехнические решения лля электроснабжения электропитания и таких устройств на промышленных предприятиях остаются неизменными длительное время [74, 105, 134]. Наиболее распространённым является электропитание технологических установок в пределах цехов по кабельным линиям напряжением 0,4 кВ. При существующих электропитания подходах К организации системы И использования В

технологических установках и процессах токов и напряжений с повышенными частотами возникает необходимость применения преобразователей напряжения и частоты на каждой технологической установке (потребителе), общее количество которых на предприятии может достигать десятков и сотен единиц (например, цех электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты). Значительное количество преобразователей напряжения и частоты ухудшает электромагнитную обстановку (ЭМО) на предприятии, снижает гибкость и надежность технологического процесса, требует сложных систем управления и автоматики, приводит к повышению себестоимости продукции. В связи с этим актуальной задачей является разработка и применение новых технических решений для централизованного электроснабжения технологических установок и устройств, использующих напряжения и токи повышенной частоты. Такие решения с учетом последних тенденций в развитии электротехники и электроснабжения связаны в основном с различными вариантами применения новейших силовых высоковольтных полупроводниковых компонентов, прежде всего биполярных транзисторов с изолированным затвором (англ. IGBT). Значительный прогресс в сфере производства таких компонентов на протяжении последних 10-15 лет привел к значительному росту их рабочих показателей (рабочие токи до 1500 А, рабочее напряжение до 3000 В), уменьшению потерь электроэнергии в открытом состоянии, повышению скорости переключения, быстрому и значительному снижению стоимости, габаритов и веса и т.д. Поэтому существует много примеров [1-4, 22-31, 135, 140, 144], когда применение устройств компонентов силовой на основе электроники В различных электроэнергетических и электротехнических установках обеспечивает как технический, эффект, так И экономический позволяя повысить энергоэффективность, надежность и гибкость управления технологическим процессом в промышленности. Возможность создания и применения мощных и эффективных преобразователей напряжения на основе IGBT транзисторов позволяет рассмотреть способы организации новые локальных систем промышленного (производственного) электропитания нового поколения для устройств, работающих на напряжении повышенной частоты с помощью централизованного источника электропитания повышенной частоты. Объединяя в

преобразователь составе силовой полупроводниковый напряжения своем повышенной частоты, высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты, силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты и потребителей специального назначения (например, объекты электротепловой обработки железобетонных изделий), образует система локальный электротехнический комплекс повышенной частоты (ЭТКПЧ) для электропитания электротехнических и электротехнологических устройств и объектов.

Существующий уровень развития теоретических разработок в этой области требует проведения дополнительных исследований для эффективного решения вопросов разработки, изучения и применения подобных ЭТКПЧ с использованием методов математического моделирования.

ЭТКПЧ, Объект исследования локальный включающий себя В полупроводниковый преобразователь напряжения, высоковольтные кабельные повышенной линии частоты, силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты и потребителей электрической энергии, предназначенный для централизованного электропитания большого числа устройств, требующих применения напряжений и токов повышенной частоты (объекты электротепловой обработки железобетонных изделий и др.).

**Предмет исследования** – методики расчета, анализа установившихся режимов работы и компонентов ЭТКПЧ.

**Цель работы** – разработка методик расчета установившихся режимов работы и компонентов ЭТКПЧ.

Задачи, решаемые в работе:

1) разработка методики электрического расчета и моделирования установившихся режимов работы ЭТКПЧ;

2) разработка методики выбора рабочего напряжения высоковольтной кабельной линии электропередачи повышенной частоты в составе ЭТКПЧ;

3) создание численно-аналитической методики расчета температурных характеристик высоковольтного силового кабеля в электропередаче в составе ЭТКПЧ;

4) разработка способов расчетного определения конструктивных параметров высоковольтных силовых трансформаторов ЭТКПЧ и параметров их схемы замещения;

5) разработка методики определения показателей эффективности ЭТКПЧ;

6) экспериментальное исследование характеристик действующих макетов ЭТКПЧ в целях проверки достоверности разработанных расчетных методик.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. Работа соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности – «Научная специальность, объединяющая исследования по ... общим закономерностям преобразования, накопления, передачи и использования электрической энергии; ... В рамках объектами изучения научной специальности являются электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии, ... электроснабжения, электрооборудования, электротехнологии промышленных . . . И сельскохозяйственных предприятий и организаций,... служебных и жилых зданий, специальной техники ... Электротехнические комплексы и системы являются неотъемлемыми составными частями систем более высокого уровня или могут рассматриваться как самостоятельные технологические комплексы ... должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование этих систем...» – в диссертационном исследовании разработаны методы расчета, математического моделирования, а также анализа установившихся режимов работы ЭТКПЧ; в части области исследования – пункту 1: «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пунктам 1-6; пункту 2: «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пунктам 1-6; пункту 3: «Исследование работоспособности И качества функционирования электротехнических комплексов И систем В различных режимах, при

разнообразных внешних воздействиях» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пунктам 1–6; пункту 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пунктам 1–6; пункту 5 «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса» соответствуют результаты, полученные при решении задач по пунктам 5–6.

#### Научная новизна работы:

1. Разработана методика электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ на основе метода частотного анализа с использованием разложения Фурье, учитывающая: фактический вид осциллограммы ЭДС полупроводникового преобразователя; изменение активного сопротивления обмоток силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты и токоведущих элементов высоковольтной кабельной линии вследствие явления скин-эффекта; зависимость внутреннего сопротивления транзисторов полупроводникового преобразователя напряжения в открытом состоянии от частоты протекающего через них переменного электрического тока; наличие потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов и учет влияния на них частоты приложенного напряжения.

2. Предложена методика выбора наибольшего рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ, учитывающая частоту рабочего напряжения, длину кабельной линии электропередачи, заданную эксплуатационную надежность и срок службы таких электропередач.

3. Разработана численно-аналитическая методика электротеплового расчета характеристик высоковольтного силового кабеля в электропередаче с повышенной частотой рабочего напряжения, основанная на использовании дифференциального уравнения теплопереноса, учитывающая влияние эксплуатационных факторов на теплофизические параметры материалов изоляции, а также токоведущих частей и позволяющая выбирать предельное значение рабочего тока высоковольтного кабеля.

4. Предложена уточненная методика расчетного определения конструктивных параметров и параметров схемы замещения высоковольтных силовых трансформаторов повышенной частоты ЭТКПЧ.

5. Разработана методика определения показателей эффективности ЭТКПЧ.

#### Практическую значимость работы представляют:

1. Разработанная методика электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ и ее программно-алгоритмическая реализация на ЭВМ, позволяющая выбирать рациональные технические решения, проводить всесторонние исследования характеристик и показателей установившихся режимов работы комплексов методами математического моделирования вместо проведения длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

2. Разработанная методика и результаты расчета наибольшего рабочего напряжения кабельной И передаваемой мощности высоковольтной электропередачи в составе ЭТКПЧ, позволяющие обоснованно выбирать значения этих параметров при конструировании систем локального электропитания с применением таких комплексов И учетом конкретных факторов производственных условий.

3. Разработанная методика И результаты расчета распределения кабельной температурного поля в толше изоляции высоковольтной электропередачи в составе ЭТКПЧ на основе численно-аналитического метода, позволяющие определить максимальный рабочий ток электропередачи и передаваемую мощность, исходя из эксплуатационных условий.

4. Способ определения и результаты расчета основных конструктивных параметров, а также методика и результаты расчета индуктивных и емкостных параметров обмоток высоковольтных силовых трансформаторов ЭТКПЧ, позволяющие достоверно определять параметры схемы замещения таких устройств при выполнении электрического расчета их установившихся режимов работы.

5. Расчетные и экспериментальные результаты определения показателей эффективности ЭТКПЧ.

Внедрение. Научные и практические результаты работы внедрены в ОАО «ДСК» г. Иваново, используются в учебном процессе на кафедре

«Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина и кафедре «Автоматика и радиоэлектроника» Ивановского государственного политехнического университета.

Методы исследования. Для решения задач в работе использовались методы физического и математического моделирования, методы теории электрических цепей, имитационное моделирование на ЭВМ с использованием программного комплекса Matlab, методы теории вероятностей и математической статистики.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. Методика электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ, адекватность которой подтверждают результаты моделирования, полученные на математической модели электротехнического комплекса с использованием ЭВМ, а также на физических моделях, испытанных в лабораторных и производственных условиях.

2. Методика и результаты расчета допустимого рабочего напряжения и передаваемой мощности высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ.

3. Численно-аналитическая методика электротеплового расчета высоковольтного кабеля повышенной частоты, а также полученные на ее основе численные результаты предельных токов высоковольтной кабельной линии ЭТКПЧ.

4. Методика и результаты расчета основных конструктивных параметров и параметров схемы замещения высоковольтных силовых трансформаторов ЭТКПЧ.

5. Результаты исследования показателей эффективности ЭТКПЧ.

работы обеспечивается Достоверность результатов применением известных методов расчета электрических цепей, методов математического и статистического определения характеристик изоляции, использованием результатов эксплуатационных испытаний, экспериментальных данных других полученных В работе, совпадением авторов И данных, расчётных И экспериментальных результатов.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались на Всероссийской конференции «Национальный конгресс по

энергетике» (Казань, 2014 г.), на VIII, IX и X Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2013-2016 гг.), XVIII Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («Бенардосовские чтения») (Иваново, 2015 г.), на Двадцать первой и Двадцать второй международных научноконференциях технических студентов И аспирантов «Радиоэлектроника, (Москва, 2015–2016 гг.), электротехника И энергетика» на Одиннадцатой международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2016 г.) на VI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Иваново, 2015 г.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 24 работах, в том числе 14 статьях, из них 5 – в научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, и 10 – в тезисах докладов международных научно-технических конференций, получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке методик расчета на основе частотного анализа и моделирования установившихся режимов работы ЭТКПЧ. проведении вычислительных экспериментов на математических моделях, анализе и оценке полученных результатов, разработке численно-аналитической методики расчета температурного поля в изоляции высоковольтного кабеля, разработке методики рабочего расчета наибольшего напряжения передаваемой мощности И высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ, разработки методики определения конструктивных параметров силовых трансформаторов и параметров их схем замещения, подготовке расчетных программ «Программа для расчета высоковольтного трансформатора с частотой более 5 кГц» и «Расчет высоковольтной электропередачи промышленной частоты гармоническим методом», апробации результатов исследования путем проведения натурных экспериментов и подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объём

работы составляет 244 страницы, содержит 92 рис., 19 табл. и 9 приложений. Список литературы состоит из 145 наименований.

Глава 1 посвящена обзору современных технологий создания и применения полупроводниковых преобразователей напряжения и частоты, их влияния на сферу промышленного производства и жизнедеятельность человека. Отражены последние достижения производства полупроводниковых элементов И особенности их применения в преобразовательной технике. Учитывая, что в ЭТКПЧ составе применяются силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты, кабельные электропередачи повышенной частоты, произведен анализ современных методов расчета основных конструктивных и технико-экономических параметров таких трансформаторов. Выполнен анализ существующих решений и разработок в области силовых кабелей для передачи электроэнергии на повышенных частотах, методик диагностики и испытаний полимерной изоляции. Проанализированы варианты организации локальной сети централизованного электропитания электротехнологических установок повышенной частоты, объектов ЭТО.

Глава 2 содержит теоретические положения методики расчета установившихся режимов работы и компонентов ЭТКПЧ, предназначенных для создания централизованных систем электропитания объектов, использующих токи и напряжения с частотой, отличной от промышленной. Для решения задач по математическому моделированию ЭТКПЧ с несинусоидальными параметрами переменных токов и напряжений использован метод частотного анализа, когда времени воздействующего на электрическую цепь кривая изменения во напряжения (ЭДС) раскладывается в ряд Фурье, т.е. представляется суммой гармоник, кратных основной частоте. Расчет выполняется по каждой гармонике, далее суммируются токи и напряжения по всем гармоникам в каждой точке электрической сети. В качестве объекта применения частотного анализа рассмотрен вариант ЭТКПЧ, предназначенного для электропитания объекта ЭТО железобетонных изделий токами повышенной частоты. При разработке математической модели ЭТКПЧ можно предложить три варианта представления реальной осциллограммы ЭДС транзисторного преобразователя от которого напряжение подается в электропередачу. В варианте «трапеция с паузой»,

соответствует реальной осциллограмме, который в наибольшей степени аналитического решения для определения амплитуды гармоник не существует. амплитуды k-й гармоники с Для нахождения помощью численного интегрирования получено аналитическое выражение. ЭТКПЧ может быть представлен двумя возможными вариантами схемы замещения, в которых кабельная линия отражена П-образной схемой замещения, или как элемент с распределенными параметрами. Особенностью этих схем является то, что в традиционной Т-образной схеме замещения силовых трансформаторов с активными и индуктивными элементами обязательно учитываются емкости обмоток относительно земли. При расчете установившегося режима важной особенностью схемы замещения является зависимость от частоты гармоники значений содержащихся В ней активных сопротивлений, обусловленная поверхностным эффектом, медленным процессом диффузного распространения неосновных носителей заряда от эмиттерного к коллекторному переходу в транзисторах преобразователя напряжения.

В составе ЭТКПЧ для передачи электрической энергии к нагрузке применяются высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты. Для рассматриваемых электропередач с учетом таких важнейших факторов, как частота рабочего напряжения, протяженность кабельных линий, требуемый срок эксплуатации и эксплуатационная надежность разработана методика выбора рабочего напряжения. Для максимальной мощности определения электротехнического комплекса наряду с оценкой максимального напряжения компонентов необходим расчет предельных токовых нагрузок кабельной линии электропередачи. Величину предельного электрического тока, протекающего по жиле кабеля, определяет температурный режим изоляции электропередачи. методика Предложена численно-аналитического электротеплового расчета установившегося режима кабеля, определяемая процессом теплопереноса в материале, который в общем случае описывается дифференциальным уравнением в частных производных.

Приведены теоретические положения методики расчета основных конструктивных и технико-экономических показателей силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты как неотъемлемой части ЭТКПЧ.

Частотный диапазон работы ЭТКПЧ составляет от 5 до 20 кГц, что обуславливает применение ферритового магнитопровода. Расчет трансформатора базируется на методике расчета трансформаторов с ферритовым Ш-образным магнитопроводом. Отличительной особенностью разработанной методики является учет частоты воздействующего напряжения, и, как следствие, выбор конструкции и параметров проводов как первичной, так и вторичной обмоток силового трансформатора повышенной частоты с учетом величины эквивалентной глубины проникновения электромагнитного поля в толщу медного проводника. Разработана уточненная методика расчета емкостных и индуктивных параметров обмоток силовых трансформаторов повышенной частоты, схемы замещения трансформатора. Эти сведения необходимы для исследования процессов, протекающих в самих обмотках и схемах замещения трансформатора в составе ЭТКПЧ. Для расчета ёмкостных и индуктивных параметров обмоток трансформатора использована энергетическая методика (оценки запасенной энергии электрического поля в изоляции). С учетом энергетической методики, примененной к конструкции трансформатора и схеме соединения ёмкостей в его обмотках получены аналитические выражения для расчёта емкостей секции на землю, межслоевой емкости, межсекционной емкости. Предложена методика оценки показателей энергетической эффективности ЭТКПЧ. На основании методики частотного анализа можно вычислить мощности потерь в активных сопротивлениях схемы замещения комплекса, мощности потерь в магнитопроводах трансформаторов и преобразователя транзисторах с учетом частоты напряжения каждой И воздействующей гармоники, что позволило оценить КПД всего комплекса и его отдельных элементов (преобразователя напряжения и кабельной электропередачи).

Глава 3 содержит результаты проверки разработанных методик, описанных в главе 2. Приведены методика и результаты экспериментальных исследований силовых трансформаторов повышенной частоты. Представлены расчетные результаты режимов холостого хода и короткого замыкания трансформатора мощностью 4 кВА. Отражены эксперименты на примере физической модели трансформатора мощностью 3 кВт с номинальными напряжениями обмоток  $U_1$  =250 B,  $U_2$  = 1250 B, рабочей частотой f = 13 кГц, первичной обмоткой из 26 витков медного эмалированного провода диаметром 1,5 мм, вторичной обмоткой,

состоящей из провода диаметром 0,7 мм из пяти секций (катушек) по 26 витков (полное число витков вторичной обмотки – 130). Были выполнены измерения ёмкостей и индуктивностей рассеивания обмотки цифровым RLC-метром APPA 703 и произведено сравнение с расчётными ёмкостными и индуктивными параметрами трансформаторов, полученными с помощью расчетной энергетической методики.

Предложена программная реализация методики электрического расчета установившихся режимов ЭТКПЧ на основании алгоритма в среде Matlab. Исходными сведениями расчетов и моделирования являются: амплитуда ЭДС полупроводникового преобразователя; форма осциллограммы ЭДС; заданные параметры силовых высоковольтных трансформаторов; число гармоник для разложения Фурье  $N_{K}$ ; параметры кабельной линии и высоковольтных трансформаторов; параметры сопротивления нагрузки. Результатом работы программы являются расчетные осциллограммы ЭДС полупроводникового преобразователя U(t), напряжений в начале кабельной линии  $U_1$ , в конце кабельной линии  $U_2$ , напряжения на нагрузке  $U_H$  с учетом характера изменения во времени ЭДС источника. В методике произведен выбор обоснованного значения числа гармоник N<sub>K</sub> разложения кривой ЭДС в ряд Фурье на основании точности вычислений  $(N_{K}=3000,$ погрешность 0,0005%) И оптимизации времени моделирования (процесс многократного численного интегрирования кривой «трапеция с паузой») и учтено изменение величин сопротивлений схемы замещения в зависимости от частоты гармоники. Для всесторонней проверки предложенной методики электрического расчета (глава 2) выполнено сравнение результатов расчета и эксперимента в различных условиях с использованием лабораторной физической модели ЭТКПЧ. Экспериментальная схема позволяет использовать кабели РК-50 или РК-75 различной длины, изменять мощность нагрузки с 1 кВт до 3 кВт. ЭДС полупроводникового преобразователя U<sub>ex</sub> представлена формой напряжения «трапеция с паузой». Произведен сравнительный анализ результатов эксперимента и расчета.

**Глава 4** включает результаты определения рабочего напряжения и передаваемой мощности кабельной линии ЭТКПЧ по разработанным в главе 2

методикам. Произведена оценка величины напряжения электропередачи в зависимости от длины кабельной линии и эксплуатационной надежности.

В производственных условиях строительного предприятия выполнены испытания экспериментального макета ЭТКПЧ при электротепловой обработке фундаментного блока размером 1100х580х400 мм. В ходе длительной работы ЭТКПЧ его КПД в среднем составил 95%, что убедительно свидетельствует о целесообразности применения таких комплексов В локальных системах промышленного электропитания устройств электротепловой обработки железобетонных изделий. Приведены результаты расчета с использованием численно-аналитической методики электротеплового расчета установившихся режимов высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты. Программная реализация выполнена согласно методике (глава 2) в Matlab, получены результаты электротеплового расчета. На основе методики оценки энергетической эффективности и технико-экономических показателей, также получившей экспериментальное подтверждение, произведен анализ этих показателей для условий возможного практического применения электротехнического комплекса повышенной частоты. КПД комплекса будет иметь величину не ниже 95%, что вполне сопоставимо с эффективностью традиционных систем на основе напряжения промышленной частоты.

работе Полученные В настоящей результаты свидетельствуют об эффективности, удобстве и целесообразности применения локальных ЭТКПЧ для централизованного электропитания электротехнических устройств, использующих повышенную частоту, а также об адекватности разработанных математических моделей и расчётных методик реальным показателям и характеристикам этих процессов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований демонстрируют высокую техническую, энергетическую И экономическую эффективность электротехнического комплекса повышенной частоты. Наличие предложенной и апробированной методики расчета таких систем позволяет осуществить их моделирование с использованием программных комплексов на ЭВМ.

#### Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ, КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

# 1.1. Конструкция и управление полупроводниковыми преобразователями напряжения, их применение в электротехнике и других сферах жизни человека

В настоящее время в связи со значительным прогрессом в области производства силовых полупроводниковых приборов – транзисторов становится возможным создание компактных и энергоэффективных преобразовательных устройств (напряжения, частоты, тока и т.п.) различного рода и назначения для применения различных отраслях народного хозяйства, решения ИХ В технологических задач широкого профиля. Одной из наиболее важных областей, где применяются полупроводниковые преобразователи, являются промышленные технологические производства металлургического, строительного, И текстильного, обрабатывающего профиля и др.

## 1.1.1. Конструкция и управление полупроводниковыми

#### преобразователями напряжения

В настоящее время существует большое разнообразие схемотехнических решений для установок на основе полупроводниковых преобразователей напряжения. Вместе с тем, для установок большой мощности, например, в электротехнике, основное применение получили преобразователи, выполненные с применением силовых высоковольтных биполярных транзисторов с изолированным затвором (англ. IGBT) и собранные по мостовой или полумостовой схеме (рис. 1.1) [1–4].



Рис. 1.1. Схемы преобразователя: а – мостовая, б – полумостовая;  $VT_1 - VT_4$ ,  $VD_1 - VD_4$  – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя соответственно,  $C_3 - C_4$  – емкости,  $U_{=}$  – постоянное напряжение на входе,  $U_f$  – переменное напряжение с частотой f на выходе

Для повышения технико-экономических параметров полупроводниковых преобразователей разносторонние Появляются ведутся исследования. преобразователи универсальные модульно-интегрированные напряжения С интегрированным преобразователем частоты, т.н. «умножителем частоты», построенных с применением многофункциональных модулей трансформаторного типа [5–7]. Исследуются вопросы управления и коммутации полупроводниковых приборов в системах электропитания электротехнических, электрофизических и других установок большой мощности. Производятся исследования классической схемы параллельного инвертора тока, используемого для индукционного нагрева и оценки потерь от работы системы управления транзисторов таких устройств, оптимизации их технико-экономических параметров [7–9]. Производители полупроводниковой техники по всему миру Semikron, IXYS, Infineon, Mitsubishi, Fuji, Sanken, Hitachi, Toshiba, ABB, IR [9, 10 и др.] предлагают наиболее современные технические решения в этой области. Прогресс в создании и применении новых конструкций полупроводниковых преобразователей, достигнутый в последние годы, позволяет создавать трехфазные инверторы с фазными интегрированными блоками на единичные фазные мощности до сотен кВт (Conergy, Danfoss, Delta, Omron, Siemens, Веспер и т.д.). Инверторы позволяют распределять нагрузку равномерно по всем трем фазам электросети, исключая несимметрию в ней. Такие системы обладают простотой монтажа (фазы собираются в трехфазные системы), а автоматизированные системы контроля отслеживают вольтамперные характеристики в режиме реального времени [9–11]. Разнообразие полупроводниковых устройств и их широкая номенклатура создает необходимость в классификации и упорядочивании информации [11–12].

Исследователями в последние годы предложены новые оригинальные преобразователей конструкции частоты, токов, способов исполнения преобразователей [12–14], среди которых особо выделяются матричные каскадные IGBT. (МПЧ) преобразователи частоты на Каждый каскад (матрица) преобразователя построены на полностью управляемых ключах IGBT модулей с двухсторонней проводимостью по мостовой схеме с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) синусоидальной [13–16]. МПЧ позволяют осуществлять обратимое преобразование электрической энергии 3-х фазной системы переменного тока в систему переменного тока с различным числом фаз, их последовательностью, регулируемой величиной напряжения и с управляемой частотой как ниже, так и выше промышленной (рис. 1.2). При этом они не содержат звена постоянного тока (ЗПТ), т.е. лишней стадии преобразования электрической энергии и являются непосредственными преобразователями частоты (НПЧ). Удешевление производства, расширение номенклатуры и дополнительных устройств позволяют расширить сферу применения частотных преобразователей в промышленности. В отличие от МПЧ, входное переменное напряжение стандартных («классических») преобразователей частоты с помощью диодного моста преобразуется в напряжение постоянного тока, питающее в свою очередь выходной инверторный мост. Инверторный мост формирует выходное напряжение переменного тока для электропривода или технологических процессов. Частота и напряжение переменного тока на выходе инвертора постоянно регулируется обратной связью системы управления, позволяя формировать необходимые энергетические характеристики для устройств и процессов [14–16].

У обычных преобразователей частоты можно выделить следующие недостатки:

• генерация большого числа гармоник в питающую сеть;

• выпрямитель выполняется с применением электролитических конденсаторов с большими массогабаритными параметрами и снижающейся ёмкостью;

• невозможность использования рекуперации энергии без дополнительных устройств (тормозного резистора).



Рис.1.2. Структурная схема матричных преобразователей частоты

МПЧ Трехфазная лишены указанных недостатков. сеть питания матрицы подключается к двигателю посредством полупроводниковых двунаправленных переключателей (рис. 1.2). При упорядоченной работе этих переключателей напряжение, его частота И мошность двигателя могут регулироваться с высокой точностью [15–16].

В настоящее время благодаря использованию последнего поколения IGBT транзистора НПЧ обрели новые перспективы. Каждый из переключателей на изображенной схеме (рис. 1.2) состоит из двух IGBT, таким образом, в силовой схеме преобразователя используется 18 IGBT. Силовые ключи в реверсивном направлении, энергия может как подводиться к двигателю, так и генерироваться обратно в сеть при торможении и рекуперации (на рис. 1.2 показано положительное/отрицательное направление тока) [15–16]. К основным достоинствам МПЧ относят:

- возможность рекуперации энергии без дополнительных устройств;
- возможность работы с большими напряжениями/токами;

• более высокие динамические характеристики (реакция на скачок напряжения, ударную нагрузку);

• высокие значения КПД (98 %) и коэффициента мощности (0,95) (рис. 1.3);

• значительное снижение входных гармонических искажений.

Так как в обычном преобразователе частоты инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное, оно формируется шириной импульсов с последующей аппроксимацией, пагубно влияя как на приводной двигатель, так и на окружающих потребителей электроэнергии и тем самым ухудшая сигнал передачи. В МПЧ формируется непосредственно синусоида, вследствие чего улучшается чистота выходного сигнала, а это повышает срок службы двигателя и позволяет увеличить расстояние между ним и преобразователем частоты без использования дополнительных выходных фильтров [14–16]. При использовании обычного преобразователя частоты возникают два типичных пика тока в фазе на выпрямителе от шины постоянного тока. Эти пики приводят к гармоническим искажениям (рис. 1.4) входного тока, достигающим порядка 80%. Ток матричного преобразователя почти синусоидальный и во время работы (под нагрузкой) почти совпадает с фазой напряжения. Во время регенерации ток сдвинут на 180°, но имеет синусоидальную форму. [14, 15].



Рис. 1.3. Зависимость КПД и коэффициента мощности от скорости двигателя

Совокупность положительных свойств позволяет применять МПЧ в следующих устройствах и системах [15, 16]:

– подъемных механизмах и механизмах с возвратно-поступательным движением (лифты, краны, прессы, системы типа «летучий нож»);

– установках, требующих быстрой реакции на изменение задания или возмущение (вентиляторы печей и дымососы, дозаторы, испытательные стенды);

 центрифугах и дробилках с длительными режимами разгона и торможения и большими моментами инерции;

 системах с высокими требованиями к помехам (лаборатории, исследовательские и медицинские учреждения).



В настоящее время МПЧ разрабатываются для их использования в составе управляемых рекуперативных электроприводов переменного тока в металлургии, металлообработке, машиностроении, добыче и переработке полезных ископаемых. Однако вместе с тем они с успехом могут быть использованы в электроэнергетических системах нового поколения и составе локальных ЭТКПЧ для устройств электротепловой обработки [17, 18].

Одним из важных направлений исследований по-прежнему остается изучение процессов переключении транзисторов в преобразователях, так называемое «мягкое» (плавное) переключение силовых полупроводниковых приборов, снижение потерь с переключением на высоких частотах и ШИМ при постоянной частоте [11, 16, 19]. Для этого могут быть использованы резонансные преобразователи. Использование резонансной схемы (рис. 1.5), состоящей из конденсатора и индуктивности, формирует ток через транзисторный ключ равный нулю прежде, чем он перейдет в состояние «открыто» / «закрыто».



Рис. 1.5. Схема резонансного преобразователя

Такой эффект устраняет большинство потерь переключения и может устранять потери, обусловленные емкостью ключа или потерями на

индуктивности рассеивания. Схема по рис. 1.5 является измененной версией прямоходового преобразователя, где простой транзисторный ключ заменен резонансным ключом, состоящим из компонентов  $VT_1$ ,  $VD_1$ ,  $L_1$  и  $C_2$ . Время от момента включения до момента выключения транзистора определяется собственной частотой резонансной схемы, выходное напряжение может управляться только изменением времени нахождения транзистора в отключенном состоянии и, следовательно, изменением частоты переключения схемы. С другой стороны, наличие синусоидальных токов в системе означает увеличение пиковых значений токов, которые будут увеличивать потери проводимости относительно схемы эквивалентного источника питания с прямоугольными импульсами [11, 16, 19, 20]. Особенностью резонансных преобразователей напряжения является высокая частота выходного напряжения, имеющая величину около 100 кГц, что обеспечивает минимальные размеры И вес силовых высокочастотных трансформаторов, а также круто убывающая внешняя характеристика. Эти качества обеспечили им уже достаточно широкое применение в конструкции малогабаритных сварочных аппаратов.

Очевидно, что конструкция, принципы работы и управления, элементная база силовых преобразователей напряжения будет совершенствоваться и развиваться одновременно с развитием отрасли силовой электроники, средств управления, автоматизации и развитием научно-технического прогресса в целом.

#### 1.1.2. Применение полупроводниковых преобразователей в электротехнике

Преобразователи напряжения/частоты нашли свое применение в различных отраслях науки и техники. Существуют многофункциональные регуляторы основе полупроводникового качества электроэнергии на преобразователя [21–23]. Регуляторы постоянного/переменного тока предназначены ДЛЯ компенсации неактивной мощности в трехфазных системах электроснабжения и выполняют такие функции как регулирование реактивной мощности, напряжения в трансформаторах, активная фильтрация и симметрирование токов нагрузки. Это

позволяет улучшить качество электроэнергии в распределительных сетях низкого напряжения [21–22].

Установки индукционного нагрева применяются на различных поэтому направления научно-технического прогресса производствах, сосредоточены в оптимизации режимов работы таких электроустановок и их компонентов. Высоковольтные источники, выполненные на основе силового полупроводникового преобразователя напряжения, используются в устройствах создания коронного разряда [23]. Например, использование безынерционных двуполярных высоковольтных инверторов и специального алгоритма управления позволяет повысить амплитуду знакопеременного напряжения на нагрузке до обратного максимального напряжения коммутирующего уровня вентиля. Источники, формирующие знакопеременное высокое напряжение, применяются для формирования коронного разряда в воздухе, например. устройств пылеочистки как на промышленных предприятиях, так и на тепловых электростанциях [23]. В Китае [24] ученые добились хороших результатов при применении высоковольтного полупроводникового источника для дефростации (использования токов повышенной частоты для разморозки) рыбных продуктов. Использование напряжения 34 кВ позволило осуществить дефростацию брикетов с рыбой при температуре 40°С. Усадка и качественные показатели продуктов повышались по сравнению с сушкой воздухом при температуре 60°C, а техникоэкономические показатели производства улучшились [24].

Перспективным направлением научно-технического прогресса в области применения полупроводниковых преобразователей в электротехнике является электротепловой обработки бетона применение метода (OTE) токами непромышленной (повышенной частоты). Авторами методики проделана значительная работа В области освоения, популяризации технологии электротепловой обработки бетона, ее технико-экономического сравнения с существующей тепловлажностной обработкой (ТВО) в рамках промышленных предприятий. В [25-29, 122, 135, 140, 142, 144] приводится разработанная теоретическая методика электротепловой обработки бетона, включающая в себя технические средства ее реализации – полупроводниковый силовой источник напряжения, выполненный на основе преобразователя напряжения на силовых транзисторах, кабельные линии электропередачи и силовые трансформаторы. Источник состоит из выпрямителя напряжения и преобразователя частоты, формирует требуемое для технологического процесса напряжение повышенной частоты от 5–20 кГц, которое используется для электротепловой обработки бетона, находящего в конструкционной опалубке с подключенными электродными системами (рис. 1.6)



Рис. 1.6. Свежая бетонная смесь в опалубке в ходе электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты

Применение электротепловой обработки бетона метода позволяет существенно повысить технико-экономические параметры производства, увеличить КПД обработки, снизить потери энергии, уменьшить сроки обработки готовых изделий, снизить себестоимость производства и т.п. [25-29, 135, 140, 142, 144]. Разрабатываются в том числе технологии предварительного разогрева бетона с помощью применения электротехнической установки высокого 122, 135, 140]. Применение напряжения [25-30,полупроводниковых преобразователей в установках по электротермической обработке (сушке) В высокочастотном электрическом древесных изделий поле (установки диэлектрического нагрева) активно используется В промышленности И исследования в этой области продолжаются [31]. Существует большое количество использующих полупроводниковые преобразователи источников питания. напряжения/частоты в своем составе для создания электрических и магнитных полей и соответствующей обработки деталей в них, сварки, плавки и других видов как поверхностной, так и внутренней обработки. На смену крупным сварочным преобразователям на основе генераторов и короткозамкнутых двигателей (сварочные посты), обеспечивающих электропитание нескольких сварочных установок, уже внедряются портативные сварочные инверторы, успешно выполняющие функции дуговой сварки на местах, выполненных на основе полупроводниковых элементов. Очевидно, что электротехническая отрасль будет активно развиваться совместно с развитием как отрасли полупроводниковых материалов, так и в целом научно-технического прогресса.

Современные достижения в области силовой электроники составляют основу для разработки принципиально новых решений в области организации принципиально новых систем электропитания [17, 18]. Одним из таких «гибкие технических решений является электроэнергетические системы переменно-постоянного напряжения» (Flexible Alternating-Direct Current Electrical Systems – FADCES), которое рассматривается как дальнейшее развитие, совершенствование и модернизацию технологии FACTS [17, 18]. В таких системах будет использовано несинусоидальное напряжение повышенной частоты. Анализ этих сведений позволяет сделать вывод о перспективности и целесообразности использования принципов FADCES для создания и применения систем локального промышленного (производственного) электропитания нового поколения с улучшенными эксплуатационными показателями для электроснабжения технологических установок, требующих применения напряжений и токов повышенной частоты.

## **1.2.** Методики расчета силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Создание ЭТКПЧ потребует локальных применения силовых трансформаторов, отличающихся повышенной (от 5 до 20 кГц) частотой рабочего напряжения. Очевидно, что разработке таких трансформаторов должен предшествовать существующих расчёта методик как силовых анализ трансформаторов промышленной частоты, так и трансформаторов повышенной частоты.

Низкочастотные силовые трансформаторы с рабочей частотой от 50 до 400 Гц выполняются с магнитопроводом различного исполнения (шихтованной или ленточной стали), обеспечивая трансформацию (повышение или понижение) напряжения с минимальным уровнем потерь в сердечнике трансформатора. В высокочастотных преобразователях силовые трансформаторы выполняются с сердечниками на основе феррита или аморфного железа, обеспечивают трансформацию напряжения, гальваническую развязку и т.п. [2, 33, 130, 131]. параметром, определяющим основные Важным конструкционные И эксплуатационные характеристики трансформатора при его расчете, является определение типоразмера сердечников. В настоящее время номенклатура компаний-производителей магнитопроводов довольна обширна. Производством ферритовых сердечников занимаются такие производители как EPCOS, TDK, Ferroxcube, Micrometals, Magnetics, FerriShield, Neosid, HARTU, Ферроприбор, Coretech, Ферро и др. Требуемый размер сердечника в методиках определяется путем итерационных вычислений [2, 33, 131]. Методика, описанная в [2], позволяет вести расчет основных параметров трансформатора на основании главного соотношения (неравенства):

$$(S_0 S_c)_{cm} > (S_0 S_c)_{pacy}, \tag{1.1}$$

где  $S_0$  – площадь окна с обмоткой в сердечнике,  $S_c$  – площадь поперечного сечения среднего стержня магнитопровода. Левая часть формулы (1.1)  $(S_0S_c)_{cm}$  – это параметр, определяемый из справочных данных сердечника, правая часть формулы  $(S_0S_c)_{pacy}$  – расчетный параметр, определяемый по формуле в  $cm^4$ .

В указанной методике говорится о применении в трансформаторах простейшей однослойной обмотки как первичной, так и вторичной. В случае использования повышенной частоты рабочего напряжения необходимо учитывать явление скин-эффекта в проводниках обмоток трансформатора. Недостатком существующих методик расчета трансформаторов повышенной частоты [2, 33] является отсутствие учета влияния поверхностного эффекта и эффекта близости при конструировании обмоток таких трансформаторов и определении параметров их схемы замещения. Кроме этого, эти методики составлены применительно к трансформаторам, имеющим обмотки слоевой конструкции, и оказываются малопригодными при разработке высоковольтных трансформаторов с высоковольтными обмотками катушечной конструкции, более предпочтительной для высоковольтных трансформаторов повышенной частоты.

Для разработки и обоснования методики экспериментальных исследований показателей и характеристик высоковольтных трансформаторов повышенной частоты необходимо обратиться к существующему опыту проведения измерений мощности, а также потерь мощности и энергии в цепях с несинусоидальными напряжениями повышенной частоты. Существует переменными токами И калориметрический метод [34, 35] измерения потерь в ленточных ВИТЫХ магнитопроводах трансформаторов и дросселей малой мощности при любых формах кривых рабочего напряжения и тока в области звуковых частот, когда о величине потерь на перемагничивание судят по изменению температуры жидкости, калориметрический Измеряемую заполняющей сосуд. мощность потерь определяют путем сравнения с известной мощностью потерь на «Джоулево тепло» при пропускании постоянного тока через специальный нагреватель. К недостаткам относится необходимость данного метода дополнительного специального оборудования (калориметрический сосуд и жидкость, а также специальный нагреватель с текущим по нему постоянным током (а значит и источник постоянного тока). Существует [34] способ определения потерь в магнитопроводах трансформаторов малой мощности на звуковых частотах, заключающийся в том, что магнитопровод с нанесенной на него намагничивающей обмоткой и прикрепленным к нему горячим спаем термопары помещают в сосуд Дьюара, определяют установившийся температурный ход калориметрической системы, после чего к намагничивающей обмотке в течение интервала времени (2-3 мин), достаточного для усреднения температуры по объему, но недостаточного для нагрева окружающей среды, прикладывают напряжение заданной величины, формы и частоты и измеряют прирост температуры магнитопровода. Затем калибровку, производят при которой через намагничивающую обмотку магнитопровода с предварительно измеренным сопротивлением пропускают постоянный такой которой ток величины, при прирост температуры

магнитопровода за одинаковый промежуток времени такой же, как и при перемагничивании в переменном поле. По измеренным значениям тока и сопротивления определяют мощность постоянного тока и равную ей мощность потерь в магнитопроводе при перемагничивании его в переменном поле [34]. Недостатками указанного способа являются большие затраты материальных ресурсов (сосуд Дьюара, термостат), а также необходимость применения очень точного И чувствительного оборудования для калибровки И измерения сопротивления обмотки трансформатора. Учитывая величину сопротивления обмотки трансформатора, процедура измерения является сложной и требующей высокоточного (а, значит, дорогостоящего) измерительного оборудования. Кроме того, метод требует значительных ресурсно-временных затрат.

Известны [35] различные конструкции ваттметров для измерения мощностей на ВЧ и СВЧ, основанные на калориметрическом, болометрическом, термоэлектрических методах измерения (промышленно изготавливаемый ваттметр поглощаемой мощности МЗ-11А, измеритель мощности калориметрический МЗ-13) Существуют методики измерения мощности с применение ферритовых элементов, зондовых методов и эффекта Холла [35]. Указанные методы и технические решения требует специального оборудования (калориметров) и создают сложности при проведении простых натурных экспериментов.

Вполне очевидно, что для оценки показателей энергетической эффективности силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты требуется по возможности технически простой, экономичный и точный способ определения потерь в обмотках и магнитопроводе трансформатора с проведением опытов короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (XX) соответственно при различной форме, амплитуде и частоте приложенного напряжения. Этот метод может быть основан на калориметрическом методе с адаптацией его к конкретному объекту и окружающим условиям.

В настоящее время весьма перспективным материалом для изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов повышенной частоты является аморфное железо, важнейшим преимуществом которого является значительно более высокое значение рабочей индукции: 0,8–1 Тл против 0,18–0,22 Тл для феррита [35].

#### 1.3. Современные разработки силовых кабелей с полимерной изоляцией

Силовые кабели высокого напряжения остаются главным инструментом распределения электрической энергии в кабельных сетях городского и промышленного электроснабжения. Наиболее перспективными и актуальными являются кабели с изоляцией из полиэтилена и сшитого полиэтилена (СПЭ). Как отмечено в [36–38], переход от кабелей с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ) к СПЭ кабелям, связан с возрастающими требованиями эксплуатирующих организаций к техническим параметрам кабелей.

К преимуществам СПЭ кабелей относят:

• высокая пропускная способность кабелей СПЭ по сравнению с БПИ кабелями, повышенный порог максимальных температур;

• низкий вес, меньший диаметр и радиус изгиба СПЭ кабелей, следовательно, снижение затрат на транспортировку и монтаж;

 низкая повреждаемость по сравнению с находящимися в эксплуатации кабелями;

• меньший нагрев за счет малых значений относительной диэлектрической проницаемости (  $t^0 = 20$  °C –  $\varepsilon = 2,3 \div 2,4$ ) и коэффициента диэлектрических потерь ( $tg \delta = 0,001$ );

• устойчивость при коротком замыкании;

• удобство монтажа в сложных технических конструкциях (при отрицательных температурах без предварительного разогрева).

Применение данных кабелей по сравнению с традиционными в поливинилхлоридной изоляции позволяет [36–38]:

• использовать жилы меньшего сечения для передачи равной мощности;

• увеличить длительно допустимую температуру нагрева жил кабелей до 90°С;

• стойкость к повышению температуры в аварийной ситуации до 130° С;

• увеличить длительно допустимую температуру нагрева жил кабелей при коротком замыкании до 250°С [36–37];

• допустимый ток короткого замыкания, действующий на площади 1 мм<sup>2</sup>:

– для жилы из меди – до 144 А;

– для алюминия – до 93 А.

Для изготовления СПЭ кабеля используется технология сшивки двух направлений: РЕХb (SXLPE кабели, менее 1 кВ), РЕХа (XLPE кабели, выше 1 кВ) [37, 38]. Сшитый полиэтилен применяется как изоляционный материал для одножильных и трехжильных кабелей в оболочке из других материалов – полиэтилена, стальной и алюминиевой брони и т.п. При этом СПЭ кабели изготавливаются с площадью поперечного сечения жилы от 35 до 3000 мм<sup>2</sup> с толщиной изоляции до 35 мм [36–38]. Достигнутый предел по рабочему напряжению у СПЭ кабелей в настоящее время составляет от 400 до 550 кВ, с площадью сечения от 630-ти до 3000 мм<sup>2</sup>, толщиной от 27-ми до 35-ти мм. Основными производителями продукции являются ABB, NKT Cable, Камкабель, Таткабель Pirelli, Москабель и пр. Конструкция кабеля AПвПг одножильной конструкции 1x240/35 мм<sup>2</sup> на напряжение 10 кВ представлена на рис. 1.7.



Рис. 1.7. Базовая конструкция кабеля марки АПвПг 1х240/35 мм2 – 10 кВ. 1 – алюминиевая токопроводящая жила сечением 1х240 мм<sup>2</sup>, 2 – электропроводящие экструдированные экраны, 3 – изоляция из сшитого полиэтилена толщиной 3,4 мм, 4 – электропроводящие влагонабухающие ленты, 5 – экран из медных проволок, сечением 35 мм<sup>2</sup>, 6 – разделительная обмотка алюмополимерной лентой, 7 – наружная оболочка из полиэтилена

По данным зарубежных источников [36–38] процент электрических пробоев кабелей с изоляцией из СПЭ на два-три порядка меньше, чем у кабелей с БПИ. Применение кабелей с изоляцией из СПЭ напряжением 6–10 кВ позволяет решить проблемы по надежности электроснабжения, оптимизировать традиционные схемы сетей. В настоящее время, в США и Канаде доля кабелей с изоляцией из СПЭ составляет 85%, в Германии и Дании – 95%, а в Японии, Франции, Финляндии и Швеции в распределительных сетях среднего напряжения

используется только кабель с СПЭ изоляцией [39-41]. Повышенное внимание европейских ученых уделяется использованию на производствах предельно чистых и стойких к образованию водных триингов компаундов [43, 44]. Триингостойкости посвящены исследования [43–45], где сравниваются и обсуждаются результаты различных методик обнаружения водных триингов. Выполнено математическое моделирование частичных разрядов В полиэтиленовой изоляции кабелей на среднее напряжение с использованием прибора OWTS [46, 50]. Большое внимание уделяется технологии оценки остаточного ресурса кабельных линий и причинам выхода из строя кабельных муфт [49, 50]. Важным направлением научно-технического прогресса в области развития кабельной промышленности является создание негорючей кабельной изоляции. В [51–54] приведены электрические характеристики ряда высоконагревостойких электроизоляционных материалов, а также указаны предприятия, выпускающие эти материалы и их передовые разработки. В ряде патентов [52, 53] авторами предложены методы совершенствования состава кабелей и их конструкции на предмет нагревостойкости. По результатам испытаний кабелей в условиях пожара фиксируются повреждения, внешние условия, и т.п., производится анализ повреждений [53, 54]. Разрабатываются и применяются силовые кабели высокого напряжения со встроенным волоконнооптическим модулем (является термодатчиком) [55].

Значимую часть в научно-исследовательском прогрессе кабельной техники и технологий являются разработки на основе явления сверхпроводимости [56, 57, 58]. Учеными различаются низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) работающие при 4-5°К или минус 269-268°С что является технически сложным и затратным процессом из-за охлаждения [56–58]. В России разработками сверхпроводников и опытных образцов кабельных линий заняты ОАО «ВНИИКП» и ОАО «НТЦ Электроэнергетики», ими изготовлен и испытывается 30-метровый кабель с номинальным током 1500 А при напряжении 20 кВ [59-62]. Кабели на основе сверхпроводимости и устройства на ее основе могут быть успешно энергосистем крупных [63–67]. применены В составе городов Ведутся исследования добавок в составе токопроводящих лент, способных снизить потери проводятся экспериментальные исследования сверхпроводников на действующих подстанциях и энергосистемах [68–69]. Очевидно, что сверхпроводящие линии электропередачи смогут обеспечить возможность значительного увеличения передаваемых мощностей при сохранении габаритов силовых кабелей, значительном снижении потерь мощности и снижении их стоимости.

Кабели повышенной частоты. Для устройств, электропитания использующих токи и напряжения повышенной частоты, согласно требованиям правил устройства электроустановок (ПУЭ), целесообразно использовать токопроводы медной или алюминиевой конструкции с плотностями токов соответствующих минимуму приведенных затрат [76]. Для линий повышенносредней частоты (до 30 кГц) кроме токопроводов рекомендуется применять специальные коаксиальные кабели [70, 71]. Коаксиальный кабель КВСП-М (номинальное напряжение 2 кВ), выполненный согласно [71, 76], обладает следующим характеристиками: сердечник из алюминиевых или медных проволок (допускается использовать нить из синтетических волокон) с внутренним проводником в виде повива из медных прямоугольных проволок, изоляцией из полиэтилена, внешним проводником в виде повива из прямоугольных медных проволок, изоляцией из полиэтилена, экраном из медных лент, в оболочке из поливинилхлоридного пластиката (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Кабель КВСП-М

Коаксиальный кабель КВСП-М номинальным напряжением 2 кВ с техническими характеристиками (табл. 1.1) рассчитан на допустимые токи, указанные в табл. 1.2 [76].
Волновое сопротивление	50 или 75 Ом
Длительно допустимый ток частотой 1,7 МГц	от 10 до 40 А
Длительно допустимые напряжения при частоте 1,76 МГц	от 5,0 до 10,0 кВ
Температура окружающей среды	от -60°С до +40°С
Максимально допустимая температура на жиле	+85°C
Минимальная температура прокладки	-15°C
Строительная длина не менее	100 м
Срок службы не менее	15 лет

Таблица 1.1. Технические характеристики КВСП-М

Таблица 1.2. Допустимые токи кабеля КВСП-М

<i>f,</i> кГц	0,5	2,4	4,0	8,0	10,0
<i>I</i> , A	400	360	340	300	290

Кабели КВСП-М применяются для передачи электроэнергии в стационарных установках частотой до 10 кГц при номинальном напряжении 2 кВ [71, 76].

Таким образом, максимальная мощность, передаваемая по кабелю на частоте 10 кГц при номинальном токе в 290 А ограничивается 580 кВт, что является достаточным для выполнения централизованных схем электропитания устройств с применением напряжения повышенной частоты. Стоимостные показатели кабеля составляют порядка 61 руб. за метр на октябрь 2016 г. [71]. Возможные конструктивные варианты кабеля КВСП-М представлены на рис. 1.9.



Рис. 1.9. Конструкционное исполнение кабеля КВСП-М: а – внутренний проводник сплошной, б – внутренний проводник скрученный. 2 – изоляция: сплошная полиэтиленовая (ПЭ) диаметром 7, 9, 11, 13, 17, 24, 33 или 44 мм; 3 – внешний проводник: повив из медных прямоугольных проволок толщиной 0,4 мм или оплетка из медных проволок диаметром 0,2–0,3 мм; 4 – оболочка: светостабилизированный полиэтилен, поливинилхлоридный (ПВХ) пластикат или свинец; 5 – защитный покров: по ГОСТ 7006-72

С целью максимального удешевления и упрощения конструкции ЭТКПЧ, в составе которых применяются высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты, целесообразно рассмотреть более доступные варианты

коаксиальных кабелей, представленных на рынке (с меньшим диаметром жилы и слоем изоляции). К числу таких вариантов следует отнести обширную номенклатуру радиочастотных кабелей с волновым сопротивлением 50 и 75 Ом, имеющих низкую стоимость.

Полимерная изоляция, применяемая в коаксиальных кабелях, имеет свойство стареть (т.е ухудшать свои электрофизические свойства как диэлектрика под воздействием длительно приложенного напряжения) [72, 73]. Для определения уровня максимального рабочего напряжения коаксиальных кабелей в составе электротехнических комплексов необходимо провести экспериментальные исследования по определению электрической прочности изоляции кабеля.

Толщина кабельной изоляции может быть определена [72] по формуле:

$$\Delta_{H3} = U_{\phi 50\Gamma_{\rm H}} / E_{CP} , \qquad (1.2)$$

где  $U_{\phi 50\Gamma u}$  – фазное напряжение 50Гц (эффективное значение);  $E_{cp}$ = 2,5 MB/м – средняя напряженность поля в изоляции, численное значение которой принято на основании обобщения опыта конструирования и эксплуатации кабелей с такой изоляцией [72, 73].

Для силовой кабельной техники общего назначения существует четкая регламентация по выбору номинального напряжения [74] и его рабочей частоты, в отсутствует такая регламентация систем электроснабжения тоже время специального назначения и сетей вторичного электропитания [75]. Указанный фактор позволяет выбирать значения напряжения коаксиальных кабельных систем повышенной частоты отличным от ряда стандартных напряжений в [74]. Независимо от выбранной величины рабочего напряжения изоляции кабеля подвергается воздействию длительного рабочего напряжения, кратковременным перенапряжениям, что приводит к старению изоляции. Процесс старения диэлектрика под воздействием эксплуатационных факторов (электрическое поле, температура, влажность и т.п.) является нормальным явлением [72, 73] и в настоящее время контролируется с помощью технических средств диагностики и системы планово-профилактических испытаний. В ПУЭ [76] регламентируются объём, нормы и порядок проведения как профилактических, так и приемо-сдаточных испытаний. В России помимо ПУЭ существуют стандарты и нормативные

документы (ГОСТ), регламентирующие порядок работы с кабельной продукцией на стадии изготовления, монтажа, эксплуатации и испытаний [77–91]. Нормативные документы (а также рекомендации) для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [77, 78, 80, 86–88] выделяются в отдельную категорию. Они разработаны как производителями кабельной продукции [90, 91], эксплуатирующими организациями так и международными инженерными сообществами (CIGRE, IEEE), комиссиями (МЭК) [87–89]. Методика современных испытаний построена на неразрушающем воздействии на изоляцию кабеля повышенным напряжением. «Щадящим» для кабеля можно считать переменное напряжение сверхнизкой частоты (VLF) воздействующего напряжения (0,1 Гц и ниже), оно не приводит к скоротечному старению изоляции и сокращению ее эксплуатационного ресурса в ходе проведения испытаний [92–97]. В настоящее время ассортимент установок с технологией VLF для испытаний кабелей крайне разнообразен – отечественные: УВУ-30 СНЧ, АИСТ СНЧ 60, АВ-60-0,1; зарубежные – HVA28-TD, FRIDA-TD, VIOLA (Австрия), KPG 38 кВ, VLF (Германия), VLF-90CMF (США) и др. [98, 99].

Температурные режимы работы кабельных линий. Одной из важнейших характеристик работы высоковольтной кабельной электропередачи является установившийся температурный режим изоляции электропередачи, который определяет предельную величину электрического тока, протекающего по жиле кабеля [72, 73]. Согласно [100] длительно допустимый ток (А) кабеля промышленной частоты рассчитывается по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta \Theta - W_d \left( 0.5T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \right)}{RT_1 + R \left( 1 + \lambda_1 \right) T_2 + R \left( 1 + \lambda_1 + \lambda_2 \right) T_3 T_4}},$$
(1.3)

где  $\Delta \Theta$  – разница температур между токоведущей жилой и окружающей средой, °C;  $W_d$  – диэлектрические потери на единицу длины, Bт/м;  $T_1$  – тепловое сопротивление между жилой и металлическим экраном °C м/Вт;  $T_2$  – тепловое сопротивление между металлическим экраном (оболочкой) и броней °C м/Вт;  $T_3$  – тепловое сопротивление наружного покрова °C м/Вт;  $T_4$  – тепловое сопротивление окружающей кабель среды °C м/Вт (для земли эта величина обусловлена процессом теплопроводности, а для воздуха – процессом конвекции и излучения); R – электрическое сопротивление токопроводящей жилы переменному току при максимально допустимой температуре жилы, Ом/м;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – отношение общих потерь в металлических экранах и броне к сумме потерь в токопроводящих жилах. Применение формулы (1.3) возможно при знании всех параметров тепловой и электрической схемы замещения силового кабеля, входящих в формулу (1.3). Здесь важно учесть, что величина диэлектрических потерь  $W_d$  (1.3), оказывающая влияние на процессы нагрева изоляции, с ростом частоты воздействующего напряжения существенно возрастает [72], поэтому применение высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты рабочего напряжения, в которых рабочая частота составляет от 5 до 20 кГц, требует обязательного учета диэлектрический потерь и рассеиваемой мощности даже при сравнительно низких напряжениях.

Для расчета температурного поля кабельной линии можно выделить два основных способа – метод конечных элементов (МКЭ) и цепные расчеты. В первом случае для моделирования и расчетов используются программные комплексы – ANSYS, Comsol Multiphysics, ELCUT и т.п. Результаты полевых расчетов высоковольтных кабелей позволяют учесть взаимное расположение кабельных линий в кабельном канале/траншее, учесть параметры грунта, протекающих по экрану токов и т.п. [102, 103]. Реализации МКЭ и проработка кабеля и окружающей модели высоковольтного его среды, a также электротехнических свойств материалов представляется трудоемким процессом. Кроме того, для учета процессов протекания тока в экране кабеля или моделирования режимов его работы (графики нагрузки) необходимо выполнять комбинацию полевых моделей и цепных, например, с помощью Comsol **Multiphysics** И Matlab. Такая математическая модель кабельной линии являться сложной и затрудненной для электропередачи будет простых инженерных расчетов. Альтернативой МКЭ является применение цепных методов расчета температурного поля в изоляции кабеля путем расчета тепловых сопротивлений и составления схемы замещения кабеля [72, 73].

Для создания инженерных методик расчета теплового поля в изоляции кабеля и определения предельного длительного тока жилы можно воспользоваться уравнениями теплопереноса. Температурное поле в изоляции кабеля определяется процессом теплопереноса в материале, который в общем случае описывается дифференциальным уравнением [72, 119, 142]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[ a(T) \cdot \nabla T \right] + \frac{q_V}{c(T) \cdot \rho(T)}, \qquad (1.4)$$

где  $a(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T) \cdot c(T)}$  – коэффициент температуропроводности материала изоляции,

м<sup>2</sup>/с;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c(T) – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho(T)$  – плотность материала изоляции, кг/м<sup>3</sup> (все указанные параметры в общем случае зависят от температуры);  $\nabla = \overline{i} \frac{\partial}{\partial x} + \overline{j} \frac{\partial}{\partial y} + \overline{k} \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор Гамильтона;

 $q_v$  – объемная плотность мощности тепловыделения в произвольной точке изоляции, Вт/м<sup>3</sup>. Очевидно, что разработка численно-аналитической методики на основе уравнения теплопереноса позволит создать удобный и простой метод расчета температурного поля в изоляции кабеля для определения максимальных токовых нагрузок с учетом теплофизических свойств изоляции.

## 1.4. Анализ систем электропитания электротехнологических установок повышенной частоты

Применение метода ЭТО позволяет многократно повысить эффективность процесса термической обработки железобетонных изделий, взамен ТВО [26–29, 122, 135, 140, 142, 144]. Для обеспечения ЭТО на обрабатываемое должно быть подано напряжение повышенной частоты (5–20 кГц). Выбор конкретной величины частоты питающего напряжения определяется технологическим процессом. Таким образом, важным этапом исследования становится организация правильного варианта электропитания объектов ЭТО в рамках существующей электросети промышленного предприятия (например, цех предприятия по изготовлению железобетонных изделий) с учетом технико-экономических параметров и требований нормативных документов.

На промышленных предприятиях могут быть применены сети с различными классами напряжения [74, 75]. Факторы, определяющие класс выбранного напряжения, могут быть различными – мощность установленных электроприемников, удаленность цеховой подстанции, предполагаемая компоновка

системы электроснабжения, и т.п. От центров питания (ЦП) до понизительных подстанций электроэнергия распределяется по сетям 6–10 кВ. От подстанций 6– 10/0,4 кВ [105, 134] электрическая энергия распределяется по кабельным линиям напряжением 0,4 кВ небольшой протяженности. При большой плотности потребителей допускается увеличение напряжения до 660 В с сохранением напряжения 0,4 кВ. Сети выполняются четырехпроводными, с пофазным или трёхфазным подключением потребителей. Для большинства предприятий строительной отрасли в рамках сети внутрицехового электропитания наиболее распространённым является напряжение 0,4 кВ [105, 134].

Наиболее стандартный вариант подключения объекта(-ов) электротепловой обработки к сети 0,4 кВ промышленного предприятия при его реализации на напряжении промышленной частоты 50 Гц представлен на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Схема подключения объектов ЭТО к сетям 0,4 кВ промышленной частоты действующего предприятия сборного железобетона. 1 – понижающий трансформатор, 2 – преобразователь частоты, 3 – нагрузка (обрабатываемое изделие – например, фундаментный блок)

Для трансформации напряжения промышленной частоты в напряжение повышенной полупроводниковый частоты применяется низковольтный преобразователь частоты 2 (ПЧ<sub>i</sub>). В целях обеспечения электробезопасности персонала, согласно требованиям ПУЭ [76] и технологического процесса ЭТО применяется понижающий трансформатор 1 промышленной частоты мощностью 2,5 кВА, который может выполняться на основании готовых рыночных трансформаторов параметрами с указанными ИЛИ изготовлен ПО индивидуальному заказу. Нагрузка 3 (электроды объекта электротепловой обработки) на рис. 1.10 выступает в виде фундаментного блока, с потребляемой мощностью для ЭТО равной 2,5 кВт (мощность ЭТО зависит от объекта обработки и в указанном случае соответствует фундаментному блоку 1100х580х400мм). Количество объектов ЭТО на крупном строительном предприятии может достигать десятков и сотен единиц [25–31].

Применение для ЭТО схемы электропитания, изображенной на рис. 1.10, выполненной на основе напряжения промышленной частоты, вызывает ряд технико-экономических и конструктивных проблем:

фазам. Применение 1) неравномерная нагрузка ПО большого числа потребителей электрической энергии затрудняет процесс равномерного их распределения по фазам, в дополнении к существующей нагрузке промышленного предприятия и приводит к образованию несимметричного режима работы, появлению тока в нулевом проводе, снижение качества электрической энергии и т.п. [105, 106];

2) необходимость в дорогостоящих силовых понижающих трансформаторах промышленной частоты на каждом объекте ЭТО;

3) необходимость применения большого числа преобразователей частоты разной мощности на каждом объекте ЭТО и связанные с этим технические и финансовые сложности;

4) сложная электромагнитная обстановка (ЭМО) на предприятии. Излучение импульсных помех в окружающую среду (индуктивные помехи) и питающую сеть (кондуктивные помехи). Воздействие помех соседних преобразователей друг на друга и на измерительные приборы комплекса [76, 104, 106];

5) сложность автоматизации и гибкого управления технологическим процессом ЭТО из-за наличия большого числа преобразователей частоты, установленных на каждом объекте ЭТО;

6) низкая надежность системы;

7) напряжение 0,4 кВ и связанные с этим потери электроэнергии при передаче больших мощностей [107];

8) общая стоимость реализации системы (большое количество трансформаторов, кабелей, преобразователей, системы управления и т.п.) [107];

9) затрудненная реализация согласно требованиям ПУЭ [76], раздел электротермические установки (ЭТУ), установки индукционного и диэлектрического нагрева;

10) затрудненность реализации в условиях действующего промышленного производства.

Применение системы на рис. 1.10 противоречит требованиям ПУЭ [76] в области организации электропитания установок диэлектрического и индукционного нагрева (п. 7), в которых преобразователь частоты, по возможности, должен быть установлен в изолированной части (отдельном помещении) промышленного производства.

Указанные недостатки варианта электропитания на рис. 1.10 показывают необходимость разработки централизованной системы электропитания для потребителей специального назначения, например, объектов ЭТО. Такая система представляет локальный комплекс электропитания в рамках существующей внутрицеховой сети электроснабжения промышленного предприятия (50 Гц), когда число объектов потребителей (объектов), использующих токи и напряжения повышенной частоты достигает десятков или сотен единиц.

Одной из ключевых особенностей системы является централизованный источник питания повышенной частоты – полупроводниковый преобразователь напряжения, достижений силовой выполненный на основе последних кабельные электроники, высоковольтные коаксиальные линии (распределительная сеть) и трансформаторов повышенной частоты, образующих (OTE потребителями (объектами единый совместно с локальный электротехнический комплекс повышенной частоты.

[74–76] потребителей Согласно напряжение питания специального назначения и питающих линий к этим потребителям, может выбираться отличным напряжений [74-76],от стандартного ряда И определяется техникоэкономическими параметрами производства. В ПУЭ [76] допускается применение частот средне-повышенного диапазона (до 30 кГц) для технологических установок. Для увеличения передаваемой мощности в ЭТКПЧ может применяться форма напряжения, отличная от синусоиды (например, трапецеидальная).

На рис. 1.11 в качестве примера показана упрощенная схема такого ЭТКПЧ.



Рис. 1.11. Схема подключения объектов ЭТО к локальному ЭТКПЧ сети повышенной частоты действующего предприятия сборного железобетона. 1 – преобразователь частоты, 2 – силовой повышающий трансформатор повышенной частоты, 3 – понижающий трансформатор повышенной частоты, 4 – нагрузка (обрабатываемое изделие, например, фундаментный блок); мощность системы рассчитана на одновременную ЭТО 10 изделий

Техническое решение, представленное на рис. 1.11 следует описать как *локальный* ЭТКПЧ, подразумевая под этим определением локальный характер электрической высоковольтной кабельной сети повышенной частоты, а также локализацию функции централизованного источника питания повышенной частоты в одном элементе электротехнического комплекса (полупроводниковом преобразователе). При организации электропитания традиционным способом (рис. 1.10) потребители подключаются к сети общего назначения через большое количество источников напряжения повышенной частоты (преобразователей частоты) рассредоточенных, по территории предприятия.

Рациональность такой схемы по сравнению со схемой по рис. 1.10 обусловлена следующими соображениями:

1) Замена большого количества преобразователей напряжения относительно небольшой мощности на один преобразователь большой мощности, равной сумме мощностей по варианту рис. 1.10, сопровождается улучшением техникоэкономических показателей, т.к. более мощные установки имеют более низкие удельные стоимостные параметры, высокий КПД и т.п. [110, 111].

2) Увеличивается гибкость управления и автоматизации технологического процесса ЭТО, существует возможность полной автоматизации технологического процесса.

3) Применение однофазной двухпроводной высоковольтной кабельной линии в виде коаксиального кабеля (рис. 1.11) вместо 3-х фазной 4-х проводной

схемы электропитания низкого напряжения (рис. 1.10) позволит уменьшить габариты и стоимость линейной части установки.

4) Равномерная нагрузка по фазам питающей сети за счет применения трехфазного преобразователя напряжения.

5) Значительный эффект следует ожидать от существенного снижения массогабаритных показателей силовых трансформаторов благодаря многократному повышению рабочей частоты переменного рабочего напряжения (рис. 1.10) [108, 110, 111].

6) Указанная конструкция ЭТКПЧ для электропитания технологических установок полностью соответствует требованиям раздела 7.5 и 7.6. ПУЭ [76] (в области реализации ЭТУ, установок индукционного и диэлектрического нагрева).

Основные технические недостатки и проблемы, присущие системе электропитания по рис. 1.11:

1) импульсные помехи;

2) недостаточный уровень развития теоретических разработок для эффективного решения вопросов разработки, исследования и применения подобных ЭТКПЧ с использованием средств компьютерного моделирования.

Применение полупроводниковых преобразователей частоты, с современными IGBT транзисторами с частотами переключения в единицы и десятки кГц вызывают импульсные помехи (кондуктивные и индуктивные) [104]. Для обеспечения требований нормативных документов по электромагнитной совместимости (ЭМС) в условиях промышленного предприятия [104, 106] применительно к установке на рис. 1.11 могут быть реализованы следующие мероприятия:

1. Полупроводниковый преобразователь (рис. 1.11) согласно требованиям ПУЭ [76] может быть установлен в отдельном производственном помещении на промышленном предприятии. Контроль и управление технологическим процессом могут осуществляться дистанционно.

2. С целью улучшения ЭМС при применении IGBT-инверторов необходимо использовать одновременно LCR-фильтры и радиофильтры для ограничения помех в сеть питания и на элементы самого комплекса [104].

Внедрению указанных ЭТКПЧ (рис. 1.11) и решению связанных с этим процессом проблем должен предшествовать этап разработки методик их расчета в

различных режимах работы и методик выбора их основного силового оборудования [107–111]. Разработка методики расчета подобных ЭТКПЧ с использованием методов математического моделирования позволит проводить разносторонние исследования в области изучения режимов их работы, ЭМС, компонентов и т.п.

#### 1.5. Выводы по главе 1

1. В последние десятилетия наблюдается колоссальный прогресс в развитии полупроводниковой силовой электроники, в особенности IGBT-транзисторов, рабочие токи которых превышают величину 1500 А, а рабочие напряжения – 3000 В. Это позволяет создавать полупроводниковые преобразователи напряжения практически любой мощности и конфигурации. Полупроводниковые преобразовательные устройства уже получили различное применение в сферах народного хозяйства, в т.ч. в электротехнике и электротехнологии.

2. Одним из перспективных направлений в электротехнологии является применение электротепловой обработки железобетонных изделии токами повышенной частоты, что позволяет значительно улучить технико-экономические показатели производств и строительных предприятий.

3. Несмотря на длительную историю развития силовых трансформаторов, существующие методики не позволяют в полной мере произвести рациональный расчет и конструирование высоковольтных силовых трансформаторов повышенной частоты, которые могут успешно применяться в локальных ЭТКПЧ.

4. Существующие технические решения в кабельной технике позволяют использовать существующее поколение коаксиальных кабелей для построения локальных систем электропитания. Успешный опыт применения полимерной изоляции кабелей, методы ее диагностики и испытания могут быть применены и для локальных ЭТКПЧ.

5. Для расчета максимальной передаваемой мощности (тока) кабельных линий повышенной частоты целесообразно использовать методику численноаналитического расчета температурного поля изоляции кабеля взамен метода конечных элементов.

6. В системах электропитания промышленных предприятий наблюдается наибольшее количество проблем (высокая доля потерь электроэнергии, трудности

передачи и распределения значительных мощностей в пределах предприятия и цехов, трудности с организацией электропитания большого числа потребителей, использующих электроэнергию с нетрадиционными параметрами переменных токов и напряжений (например, повышенной частоты), вопросы ЭМС и т.д.).

7. Анализ литературных сведений позволяет сделать вывод, что в тех случаях, когда электропитание большого числа потребителей, использующих повышенной электрические напряжения И токи частоты целесообразно организовать в виде локального ЭТКПЧ, содержащего централизованный полупроводниковый преобразователь напряжения повышенной частоты, получающий питание от сети промышленной частоты 50 Гц через звено постоянного напряжения, высоковольтные силовые трансформаторы включенные выходе преобразователя и содержащий высоковольтную однофазную на кабельную линию, потребителей электроэнергии.

8. В настоящее время уровень развития теоретических разработок в сфере разработки, исследования и применения подобных ЭТКПЧ с использованием методов математического моделирования недостаточен для эффективного решения подобных вопросов. Особенно актуальной является проблема разработки математической модели, расчета установившихся режимов и параметров таких ЭТКПЧ. Такая математическая модель должна содержать следующие основные составные части: методику электрического расчета ЭТКПЧ, методику выбора рабочего напряжения кабельных линий ЭТКПЧ, методику электротеплового расчета и определения предельных токовых нагрузок кабельных линий, методику расчета параметров силовых трансформаторов повышенной частоты, методику определения показателей эффективности ЭТКПЧ. Решение этой проблемы позволит значительно снизить объем длительных, затратных и достаточно экспериментальных исследований при создании и сложных применении локальных систем промышленного электропитания на основе ЭТКПЧ. За экспериментом в этом случае остается только функция проверки правильности окончательных решений. Приведенные соображения позволили сформулировать цель и задачи настоящей диссертационной работы, указанные во введении.

### Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Как известно, при создании и применении любых электротехнических устройств основное практическое значение имеет знание их характеристик и показателей в установившихся эксплуатационных режимах работы. Поэтому в настоящее время приоритетным направлением научно-технического прогресса является разработка математических моделей и расчетных методик, позволяющих исследовать такие характеристики и показатели с помощью вычислительной техники с использованием средств математического моделирования. Эти инструменты обеспечивают значительную экономию сил, средств и времени при создании и применении электротехнических устройств нового поколения, обладающих более высокими эксплуатационными и технико-экономическими показателями.

#### 2.1. Методика расчета установившихся режимов работы электротехнических комплексов повышенной частоты, содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения с применением частотного анализа

В современной электротехнике и электроэнергетике для решения задач моделирования электротехнических устройств и электроэнергетических систем широко используется вычислительная техника с применением методов расчёта электрических цепей с синусоидальными токами на основе теории комплексных чисел. Однако ДЛЯ электротехнических установок, использующих несинусоидальные параметры переменных токов и напряжений, эти методы малопригодны, так как они предполагают синусоидальный характер изменения указанных величин во времени. Поэтому в рамках настоящей работы время весьма актуальной является задача разработки теории и методик расчёта ЭТКПЧ, содержащие преобразователи транзисторные напряжения, силовые трансформаторы повышенной высоковольтные частоты, высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты, в которых используются несинусоидальные переменные токи и напряжения повышенной частоты.

Известно, что весьма удобным и эффективным способом расчёта электрических цепей при периодических несинусоидальных напряжениях и токах является метод частотного анализа, когда кривая изменения во времени воздействующего на электрическую цепь напряжения (ЭДС) раскладывается в ряд Фурье, т.е. представляется в виде суммы гармоник [112, 113]:

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ A_k \cdot \cos(k\omega_1 t) + B_k \cdot \sin(k\omega_1 t) \right]$$
(2.1)

ИЛИ

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cdot sin(k\omega_1 t + \psi_k), \qquad (2.2)$$

где k – номер гармоники;  $\omega_I = 2\pi/T = 2\pi f_I$  – угловая частота первой гармоники (частота воздействующего напряжения);  $U_0$  – нулевая гармоника (постоянная составляющая); постоянные коэффициенты соотношения (2.1) определяются по формулам:

$$A_{k} = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \cdot \cos(k\omega_{1}t) dt;$$
  

$$B_{k} = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} U(t) \cdot \sin(k\omega_{1}t) dt;$$
  

$$C_{k} = \sqrt{A_{k}^{2} + B_{k}^{2}},$$
(2.3)

где  $\psi_k$  – фаза *k*-й гармоники.

Следующим этапом применения методики является использование существующих методов расчета электрических цепей в конкретной электрической схеме (рис. 2.1) для каждой гармоники в отдельности. Суммирование результатов расчета по всем гармоникам в каждой точке электрической сети дает искомое значение тока и напряжения. Применение метода частотного анализа позволяет получить удобный и эффективный инструмент для расчета режимов работы ЭТКПЧ и электрических цепей, содержащих транзисторные преобразователи напряжения.

В качестве объекта применения частотного анализа целесообразно рассмотреть вариант ЭТКПЧ, предназначенного для питания установки ЭТО железобетонных изделий токами повышенной частоты [25–29, 108, 140, 144]. В этом случае нагрузка (например, нагревательный элемент или объект, разогреваемый протекающим через него электрическим током) может быть представлена активным сопротивлением. Электрическая схема силовой части такого комплекса показана на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Электрическая схема ЭТКПЧ, где C – емкость на шинах постоянного тока для сглаживания пульсаций,  $VT_1-VT_4$ ,  $VD_1-VD_4$  – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя соответственно,  $Tp_1$ ,  $Tp_2$  – повышающий и понижающий силовые трансформаторы,  $l_{\kappa}$  – длина кабельной линии электропередачи,  $L_p$  – реактор

Питание комплекса осуществляется от шин постоянного напряжения  $U_{=}$ , которое получают посредством выпрямления переменного напряжения питающей сети 220/380 В частотой 50 Гц без применения сетевого трансформатора (выпрямитель на схеме не показан).

Постоянное напряжение подается на транзисторный преобразователь напряжения ( $VT_1-VT_4$ ), преобразующий постоянное напряжение в переменное повышенной частоты, осциллограмма которого близка к прямоугольной. На рис. 2.2 представлены характерные осциллограммы ЭДС на выходе транзисторного преобразователя напряжения, которые получены в экспериментах, описанных в главе 3.



Рис. 2.2. Экспериментальные осциллограммы ЭДС транзисторного преобразователя напряжения при различной скорости развертки

Рис. 2.3 иллюстрирует различные варианты теоретического представления реального изменения ЭДС во времени. Максимальная амплитуда  $U_m$ , B, принимается равной постоянному напряжению  $U_{=}$  (рис. 2.1).

Вариант (рис. 2.3, а) является наиболее простым и наглядным, однако такая осциллограмма в наименьшей степени соответствует реальному изменению ЭДС во времени (рис. 2.2). Второй вариант (рис. 2.3, б) в лучшей степени соответствует реальной осциллограмме (рис. 2.2). В третьем варианте (рис. 2.3, в) наблюдается практически полное соответствие реальной осциллограмме (рис. 2.2).



Рис. 2.3. Стилизованная осциллограмма и параметры ЭДС транзисторного преобразователя напряжения U(t): а – осциллограмма прямоугольной формы; б – трапецеидальной, в – «трапеция с паузой»; длительность амплитудного значения  $T_m$  для сигнала: б –  $T_m = (T-2\tau)/2$ ; в –  $T_m = (T-2\tau)/2$  причем,  $\tau = 2t_1 + t_2$ 

Ha преобразователя (рис. 2.1) установлен выходе повышающий трансформатор *Тр*<sub>1</sub>, высокое напряжение *U*<sub>1</sub>, В, вторичной обмотки которого подается в кабельную линию длиной  $\ell_K$ , м. В конце кабельной линии установлен понижающий трансформатор Тр2, а напряжение его вторичной обмотки приложено к нагрузке  $R_H$ , Ом, (например, это электрическое сопротивление железобетонного изделия при его ЭТО). В начале кабельной линии может быть установлен реактор L<sub>p</sub> для компенсации зарядной мощности кабеля в режиме минимальных нагрузок и холостого хода. Выбор такого объекта (рис. 2.1) применения частотного анализа обусловлен не только его практической значимостью, но и наличием в электрической цепи реактивных элементов (индуктивность линии и емкость ее изоляции), которые существенно влияют на режим ее работы, что подтвердили экспериментальные исследования [108].

ЭДС источника (рис. 2.2), в виде транзисторного преобразователя (рис. 2.1), от которого напряжение подается в электропередачу, имеет разложение в ряд Фурье, которое описывается соотношением [113]:

$$U(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\omega_l t)}{k} = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(\omega_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t), \qquad (2.4)$$

где для осциллограммы, представленной на рис. 2.3, а, согласно [113]:

$$U_k = \frac{4U_m}{\pi k},\tag{2.5}$$

где  $U_k$  – амплитуда k–й гармоники;  $f_k = kf_1 = \frac{k}{T_1}$  и  $\omega_k = 2\pi f_k$  – частота и угловая частота k–й гармоники; k = 1,3,5,7... – кратность гармоники (присутствуют только нечетные гармоники).

Для трапецеидальной формы представления ЭДС (рис. 2.3, б) амплитуда *k*-й гармоники определяется согласно [113] по формуле:

$$U_{k} = \frac{4U_{m}}{\pi\omega_{1}(2t_{1}+t_{2})} \frac{\sin\left[k\omega_{1}(2t_{1}+t_{2})\right]}{k^{2}}.$$
(2.6)

В последнем варианте (рис. 2.3, в – «трапеция с паузой») в настоящее время аналитического решения для определения амплитуды гармоник не существует. В этом случае для нахождения амплитуды *k*-ой гармоники необходимо воспользоваться общими выражениями определения коэффициентов разложения в ряд Фурье (2.3). Смысл этих соотношений заключается в том, что для нахождения искомых коэффициентов, а, следовательно, амплитуды гармоник необходимо выполнить интегрирование исходной кривой изменения величины во времени (рис. 2.3, в) в течение одного периода T [113]. При интегрировании кривую ЭДС (рис. 2.3, в) можно рассматривать как функцию, имеющую точки разрыва в местах перелома кривой, а на участках изменения величины от нуля до максимального значения  $U_m$  и наоборот следует предположить линейный характер зависимости. Учитывая эти соображения, основываясь на соотношениях (2.3) и используя обозначения рис. 2.3, в можно записать следующее выражение для определения амплитуды гармоник:

$$\begin{aligned} U_{k} &= \frac{2}{T} \cdot \int_{0}^{T} U(t) \cdot \sin(k\omega_{l}t) dt = 2U_{m} \cdot f_{1} \cdot \left( \int_{0}^{\frac{t_{1}}{2}} \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) \cdot dt + \int_{\frac{t_{2}}{2}}^{\frac{t_{2}}{2}+t_{1}} \left( \left(\frac{t-\frac{t_{2}}{2}}{t_{1}}\right) \right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \\ &+ \int_{\frac{t_{2}}{2}+t_{1}}^{\frac{t_{2}}{2}+t_{1}} \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \int_{\frac{t_{2}}{2}+t_{1}+t_{m}}^{\frac{t_{2}}{2}+2t_{1}+t_{m}} \left( \frac{1-\left(t-\left(t_{1}+\frac{t_{2}}{2}+t_{m}\right)\right)}{t_{1}} \right) \right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \\ &+ \int_{\frac{t_{2}}{2}+2t_{1}+t_{m}}^{\frac{3t_{2}}{2}+2t_{1}+t_{m}} \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \int_{\frac{3t_{2}}{2}+3t_{1}+t_{m}}^{\frac{3t_{2}}{2}+2t_{1}+t_{m}} \left( -1\right) \left( \frac{t-\left(2t_{1}+\frac{3t_{2}}{2}+t_{m}\right)}{t_{1}} \right) \right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \\ &+ \int_{\frac{3t_{2}}{2}+3t_{1}+2t_{m}}^{\frac{3t_{2}}{2}+2t_{1}+t_{m}}} \left( -1\right) \left( \frac{t-\left(2t_{1}+\frac{3t_{2}}{2}+t_{m}\right)}{t_{1}} \right) \right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \\ &+ \int_{\frac{3t_{2}}{2}+3t_{1}+2t_{m}}^{\frac{3t_{2}}{2}+3t_{1}+2t_{m}}} \left( -1\right) \left( \frac{t-\left(2t_{1}+\frac{3t_{2}}{2}+t_{m}\right)}{t_{1}} \right) \right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt \\ &+ \int_{\frac{3t_{2}}{2}+3t_{1}+2t_{m}}^{\frac{3t_{2}}{2}+3t_{1}+2t_{m}}} \left( -1\right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt + \frac{3t_{2}+4t_{1}+2t_{m}}}{\frac{3t_{2}}{2}+4t_{1}+2t_{m}}} \left( \frac{t-3t_{1}-\frac{3t_{2}}{2}-2t_{m}}}{t_{1}} \right) - 1 \right) \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt \\ &+ \int_{\frac{3t_{2}}{2}+4t_{1}+2t_{m}}^{\frac{3t_{2}}{2}+4t_{1}+2t_{m}}} \sin\left(2\pi\left(2k-1\right)f_{1}\cdot t\right) dt \right) \right). \end{aligned}$$

Теоретически для формулы (2.7) могут быть найдены аналитические выражения всех интегралов, входящих в это соотношение, однако, как показывает анализ, при его практическом использовании можно вполне обойтись применением численного интегрирования. Предполагается, что время фронта подъема напряжения и его спада (рис. 2.3, в) одинаково. Выражение (2.7) представлено для нечетной функции, однако для упрощения расчетом можно использовать четную функцию. Для трапецеидальной формы напряжения с паузой (рис 2.3, в) исходная зависимость (рис. 2.3, в) рассматривается как нечётная функция. При использовании четной функции необходимо согласно [113] в формулах (2.3) принять:

$$U_{k} = A_{k}; \ B_{k} = 0, \tag{2.8}$$

а формула (2.4) в соответствии с соотношением (2.1) приобретает вид:

$$U(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cos(\omega_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t).$$
(2.9)

Отмеченное обстоятельство, как известно [113], не сказывается на конечных результатах разложения искомой функции в ряд Фурье и последующих вычислений с использованием этого разложения, но в некоторых случаях обеспечивает определенные удобства при расчетах. Далее в расчетах принимается, что функция имеет нечетный характер.

Знание ЭДС (рис. 2.3) гармонического состава источника полупроводникового преобразователя (рис. 2.1), описываемого соотношениями (2.4) – (2.9), позволяет выполнить электрический расчет установившегося режима работы объекта (рис. 2.1) при наличии его схемы замещения. На рис. 2.4 ЭТКПЧ представлены два возможных варианта схемы замещения с высоковольтной кабельной электропередачей повышенной частоты (рис. 2.1). В первом варианте (рис. 2.4, а) кабельная линия отражена П-образной схемой замещения, что несколько упрощает вычисления, но допускается при небольшой длине линии [72, 104, 112, 114]. Во втором (рис. 2.4, б) линия представлена в традиционном и универсальном виде – как элемент с распределенными параметрами [72, 112, 115].



Рис. 2.4. Схема замещения ЭТКПЧ с высоковольтной кабельной электропередачей повышенной частоты (рис. 2.1), где  $\dot{U}_{k}$  – источник напряжения k-й гармоники,  $Z_{\theta H}$  – внутренне сопротивление источника напряжения,  $C_{m\mu}$  и  $C_{m\theta}$  – емкость обмоток низкого и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно, L<sub>SH</sub> и L<sub>SG</sub> – индуктивности рассеивания обмоток низшего и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно, R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> – активные сопротивления обмоток низкого И ВЫСОКОГО напряжения силовых трансформаторов, соответственно,  $R_{\mu}$  и  $L_{\mu}$  – активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания трансформатора,  $R_p$  – активное сопротивление реактора,  $L_p$  – индуктивность реактора,  $C_n$ ,  $L_n$ ,  $R_n$  – емкость, индуктивность, активное сопротивление кабельной линии электропередачи,  $R_{\mu}$  – нагрузка. а – используется П-образная схема замещения линии, б – используется схема замещения линии с распределенными параметрами,  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$  – удельные параметры линии (активное сопротивление, индуктивность и емкость на единицу длины)

Особенностью схем на рис. 2.4 является то, что в составе традиционной Тобразной схемы замещения силовых трансформаторов наряду с активными и индуктивными элементами обязательно учитываются емкости обмоток относительно земли. Все элементы схемы замещения приведены к первичной стороне силового трансформатора  $Tp_1$  через коэффициент трансформации  $K_{mp}$ . На вход схемы замещения подается напряжение (ЭДС), соответствующее параметрам k-ой гармоники разложения (2.4) или (2.9):

$$U_k(t) = U_k \sin(\omega_k t)$$
 или  $U_k(t) = U_k \cos(\omega_k t)$ . (2.10)

Другой важной особенностью схемы замещения рис. 2.4 является зависимость от частоты гармоники значений содержащихся в ней активных сопротивлений. Например, величина активных сопротивлений обмоток силовых трансформаторов и жилы кабельной линии  $R_T$  и  $R_{\pi}$  может возрастать с увеличением частоты вследствие поверхностного эффекта [110, 112].

Как известно, это явление характеризуется эквивалентной глубиной проникновения электромагнитной волны в проводник при протекании по нему электрического переменного тока высокой частоты [112]:

$$b_m = \sqrt{\frac{\rho_{\scriptscriptstyle M}}{\pi k f_1 \mu_0}}, \qquad (2.11)$$

где  $\rho_{_{M}}$  – удельное сопротивление материала проводника (меди);  $\mu_{0}$  – магнитная проницаемость материала проводника (равна магнитной проницаемости вакуума). Значения упомянутых выше активных сопротивлений в этом случае определяются по формулам [110]:

$$\begin{cases} R_{T(J)} = \frac{4\rho_{M}l}{N \pi d^{2}}, \text{ при } \mathbf{b}_{m} \ge \frac{\mathbf{d}}{2}; \\ R_{T(J)} = \frac{l \rho_{M}}{N \pi (d \cdot \mathbf{b}_{m} - \mathbf{b}_{m}^{2})}, \text{ при } \mathbf{b}_{m} < \frac{\mathbf{d}}{2}, \end{cases}$$
(2.12)

где l – длина, м, провода обмотки трансформатора или длина кабеля  $l_{\kappa}$ ;  $N \ge 1$  – число отдельных проводников в составе провода обмотки или жилы кабеля; d – диаметр отдельного проводника. Величину активного сопротивления, отражающего потери в магнитопроводе силового трансформатора, можно определить [112]:

$$R_{\mu} = \frac{U_k^2}{P_{ck}},$$
 (2.13)

где мощность потерь в магнитопроводе для *k*-ой гармоники в случае применения ферритовых сердечников находится с использованием соотношения [110]:

$$P_{ck} = P_{y\partial} \cdot m = 1.64 \cdot 10^{-3} \cdot f_k^{1,31} \cdot B_k^{2,49} \cdot \delta \cdot V, \qquad (2.14)$$

где  $m = \delta V$ ,  $\delta$  и V – масса, плотность материала и объём магнитопровода соответственно;  $P_{y\partial}$  – удельные потери в магнитопроводе на k-ой гармонике;  $B_k$  – индукция магнитного поля в магнитопроводе для k-ой гармоники определяется с использованием методики, изложенной в [110], по известной величине амплитуды напряжения этой гармоники  $U_k$  согласно (2.4), обмоточным данным и параметрам магнитопровода силового трансформатора.

Наиболее сложной задачей является определение влияния частоты на величину внутреннего сопротивления  $Z_{en}$  источника напряжения (рис. 2.4). Учитывая, что в схеме ЭТКПЧ (рис. 2.1) к шинам постоянного напряжения подключена емкость *C*, предназначенная для сглаживания пульсаций, можно сделать вывод, что для всех гармоник ЭДС (рис. 2.3) величина  $Z_{en}$  будет определяться сопротивлением транзисторов полупроводникового преобразователя, находящихся в открытом состоянии [1]. Известно, что параметры транзистора зависят от частоты переменного тока, протекающего через транзистор, что обусловлено, прежде всего, относительно медленным процессом диффузного распространения неосновных носителей заряда от эмиттерного к коллекторному переходу [116]. Это приводит к запаздыванию появления тока коллектора по отношению к току эмиттера, а при высоких частотах и к уменьшению амплитуды тока коллектора. Дополнительный вклад в ухудшение частотных показателей транзисторов вносят паразитные ёмкости [116]. Связь между током коллектора  $I_{\kappa}$  и током эмиттера  $I_{2}$  определяется соотношением [116]:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\rho}, \qquad (2.15)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи по току, при протекании постоянного тока и токов низкой частоты приближается к единице и получил название статического коэффициента  $\alpha_0 < 1$ , по мере увеличения частоты величина этого коэффициента постепенно уменьшается вплоть до нуля, сама зависимость описывается соотношением [116]:

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_a}} = \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{f}{f_a}},$$
(2.16)

где  $\omega_a = 2\pi f_a$  – предельная частота усиления по току (обычно указывается в паспортных характеристиках транзистора), при которой модуль коэффициента передачи уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со статическим значением:

$$\frac{\alpha(\omega_a)}{\alpha_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \,. \tag{2.17}$$

Важными паспортными параметрами силовых транзисторов являются также падение напряжения на переходе эмиттер-коллектор в открытом состоянии  $\Delta U_T$ , В, и величина постоянного тока коллектора, А:

$$I_{\kappa 0} = \alpha_0 I_{\mathfrak{I}}, \qquad (2.18)$$

при которой определяется это падение напряжения. Знание этих параметров позволяет определить величину сопротивления транзистора в открытом состоянии в статическом режиме, т.е. при протекании через транзистор постоянного тока или переменного тока низкой частоты ( $f < < f_a$ ):

$$Z_{_{6H0}} = \frac{\Delta U_T}{I_{_{\kappa 0}}} \,. \tag{2.19}$$

Значение  $\Delta U_T$  определяется конструктивным выполнением транзистора, параметрами применяемых при этом полупроводниковых материалов, свойствами коллекторного и эмиттерного переходов [116]. Можно предположить, что величина этого параметра при изменении частоты протекающего тока не будет изменяться, в то время как величина тока коллектора будет зависеть от частоты согласно (2.15) и (2.16). Эти соображения дают основание по аналогии с выражением (2.19) и с учетом соотношений (2.15), (2.16) и (2.18) определить величину внутреннего сопротивления транзистора при произвольном значении частоты следующим образом:

$$Z_{_{6H}}(\omega) = \frac{\Delta U_T}{I_{_{\kappa}}} = \frac{\Delta U_T}{\alpha(\omega)I_{_{9}}} = \frac{\Delta U_T}{\alpha_0I_{_{9}}} \left(1 + j\frac{f}{f_a}\right) = Z_{_{6H0}} \left(1 + j\frac{f}{f_a}\right).$$
(2.20)

Применение комплексной формы записи для выражений (2.16) и (2.20) отражает запаздывание тока коллектора, т.е. его сдвиг по фазе по отношению к току эмиттера при высоких частотах [116]. Однако такая форма описания внутреннего

сопротивления транзистора не соответствует физическому смыслу применения теории комплексных чисел для расчета цепей переменного тока, когда мнимая часть комплексного выражения отражает реактивные параметры (емкостное И индуктивное сопротивления, реактивную мощность) [112]. Транзистор не содержит реактивных элементов, способных повлиять на режим работы электрической цепи (рис. 2.1), а протекание через него тока независимо от сдвига по фазе сопровождается потерями энергии. Использование выражения (2.20) в расчетах может привести к серьезным ошибкам. Высказанные соображения дают основание полагать, что внутреннее сопротивление источника питания в схеме замещения (рис. 2.4) должно быть представлено активным сопротивлением, величина которого равна модулю комплексного выражения (2.20). Тогда, учитывая, что в соответствии с принципом действия мостового преобразователя (рис. 2.1) в каждый момент времени последовательно с нагрузкой включены два транзистора [116], внутреннее сопротивление источника (рис. 2.1) для *k*-ой гармоники разложения (2.4) определится по выражению:

$$Z_{_{6Hk}} = 2\left|Z_{_{6H}}(\omega_{_{k}})\right| = 2\left|Z_{_{6H}0}\left(1 + j\frac{kf_{1}}{f_{a}}\right)\right| = 2Z_{_{6H}0}\sqrt{\left[1 + \left(\frac{kf_{1}}{f_{a}}\right)^{2}\right]}.$$
(2.21)

Сопротивления реактивных элементов схемы замещения (рис. 2.4) для *k*-ой гармоники определяются известными соотношениями [112]:

$$jX_{Li} = j\omega_k L_i = j2\pi k f_1 L_i;$$
  

$$jX_{Ci} = \frac{1}{j\omega_k C_i} = \frac{1}{j2\pi k f_1 C_i},$$
(2.22)

где *i* – индекс соответствующего элемента этой схемы.

При выполнении расчетов для схемы замещения (рис. 2.4, б), когда линия представлена объектом с распределенными параметрами, для описания этого элемента необходимо использовать уравнения длинной линии, которые устанавливают связь между значениями напряжения и тока в начале и в конце линии [112, 114, 117]:

$$\dot{U}_{1} = \dot{U}_{2} \operatorname{ch} \gamma l_{K} + \dot{I}_{2} z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_{K};$$

$$\dot{I}_{1} = \dot{I}_{2} \operatorname{ch} \gamma l_{K} + \frac{\dot{U}_{2}}{z} \operatorname{sh} \gamma l_{K}$$
(2.23)

ИЛИ

$$\dot{U}_{2} = \dot{U}_{1} \operatorname{ch} \gamma l_{K} - \dot{I}_{1} z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_{K};$$

$$\dot{I}_{2} = \dot{I}_{1} \operatorname{ch} \gamma l_{K} - \frac{\dot{U}_{1}}{z} \operatorname{sh} \gamma l_{K},$$
(2.24)

где  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{I}_1$  и  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{I}_2$  – значения напряжения и тока одной и той же гармоники, соответственно, в начале и в конце линии, выраженные в комплексной форме,

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \qquad (2.25)$$

- волновое сопротивление линии,

$$\gamma = \alpha + j\beta \,, \tag{2.26}$$

$$\alpha = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0}\right)^2} - 1 \right]},$$
(2.27)

$$\beta = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0}\right)^2} + 1 \right]},$$
(2.28)

где  $R_0$ ,  $L_0$  и  $C_0$  – погонные параметры линии: активное сопротивление, индуктивность и емкость изоляции, причем, с учетом (2.12) можно записать:

$$\begin{cases} R_{0} = \frac{R_{\pi}}{l_{K}} = \frac{4\rho_{M}}{N \pi d^{2}}, \text{ при } b_{m} \ge \frac{d}{2}; \\ R_{0} = \frac{R_{\pi}}{l_{K}} = \frac{\rho_{M}}{N \pi (d \cdot b_{m} - b_{m}^{2})}, \text{ при } b_{m} < \frac{d}{2}, \end{cases}$$
(2.29)

где реактивные элементы ( $L_0$  и  $C_0$ ) определяются либо по справочным (паспортным) сведениям, либо посредством эксперимента, либо вычисляются по методике, приведенной в [112, 114, 117].

С учетом соотношений (2.27) и (2.28) значения гиперболических синуса и косинуса в уравнениях (2.23) и (2.24) определяются по формулам [112, 114, 117]:

$$sh\gamma l_{K} = \alpha l_{K} \cos \beta l_{K} + j \sin \beta l_{K};$$
  

$$ch\gamma l_{K} = \cos \beta l_{K} + j\alpha l_{K} \sin \beta l_{K}.$$
(2.30)

Процедура оценки реактивных параметров П-образной схемы замещения кабельной линии (*L*<sub>*I*</sub>, *C*<sub>*I*</sub> – рис. 2.4, а) подробно описана в [112, 114, 117].

Методика определения реактивных параметров Т-образной схемы замещения силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты ( $L_{SH}$ ,  $L_{SB}$ ,  $C_{TH}$ ,  $C_{TB}$  – рис. 2.4) подробно рассматривается в разделе 2.4.1.

Приведенные в настоящем разделе соотношения с учетом отмеченных особенностей и условий их применения позволяют рассчитать с использованием существующих методов теории цепей значения напряжений и токов в схеме замещения (рис. 2.4) в комплексной форме для каждой гармоники разложения в ряд Фурье (2.5) – (2.7). После преобразования из комплексной формы в тригонометрическую можно выполнить построение графиков изменения напряжений и токов во времени с использованием выражений [112, 114, 117] для разложения по формулам (2.5), (2.6) и (2.7):

$$U_{j}(t) = \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} U_{kj} \sin(2\pi k f_{1} t + \varphi_{kj}); \qquad (2.31)$$

$$I_{j}(t) = \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} I_{kj} \sin(2\pi k f_{1} t + \phi_{kj}), \qquad (2.32)$$

где j – индекс соответствующего напряжения или тока в схеме рис. 2.4;  $k_{max}$  – число гармоник разложения в ряд Фурье, принятое в расчетах,  $\varphi_{kj}$  и  $\phi_{kj}$  – фаза напряжения и тока k-ой гармоники в рассматриваемой точке. Представленная расчетная методика предполагает, что все параметры элементов установки имеют линейный характер изменения, за исключением двух параметров: внутреннее сопротивление транзистора в открытом состоянии (учитывается нелинейное изменение этого параметра в зависимости от частоты гармоники согласно (2.21)) и параметры ( $R_{M}$  и  $L_{M}$  на схеме замещения по рис. 2.4), отражающие характеристики магнитопровода сердечника. Программная реализация методики частотного анализа в среде Matlab представлена в разделе 3.2.

## 2.2. Методика выбора рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты

Важнейшим параметром, влияющим на технико-экономические показатели ЭТКПЧ, является рабочее напряжение и его частота. В составе ЭТКПЧ (рис. 2.1) для передачи электрической энергии к нагрузке применяется высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты. Одним из важных техникоэлектропередачи является предельное экономических параметров значение передаваемой электрической мощности, которое определяется конструкцией высоковольтного кабеля и величиной рабочего напряжения [72, 109, 117]. При этом необходимо отличительных особенностей кабельных учитывать ряд электропередач повышенной частоты, источником питания которых являются полупроводниковые преобразователи напряжения. Во-первых, в таких системах удобно и целесообразно использовать однофазное рабочее напряжение [17, 18, 109]. Во-вторых, эти системы предполагается использовать в виде локальных промышленных (производственных) ЭТКПЧ. например. лля электротехнологических установок повышенной частоты [25], и т.д. Это дает основание рассматривать такие установки как специальные электрические сети, для которых рабочее напряжение может отличаться от значений стандартного ряда номинальных напряжений [74, 75, 76] и должно выбираться максимально большим для достижения наивысшей передаваемой мощности и максимального снижения энергии. потерь В-третьих, существующие ВИДЫ обычных силовых высоковольтных кабелей малопригодны для применения в электропередачах повышенной частоты, так как вследствие влияния поверхностного эффекта значительно снижается эффективность использования сечения токоведущих жил. В настоящее время для такого применения в значительно большей степени пригодны радиочастотные кабели коаксиальной конструкции (например, КВСП-М или РК) с полимерной изоляцией [72, 76, 109]. Учитывая широкую номенклатуру таких кабелей [72, 76] и разнообразие условий их применения в электропередачах повышенной частоты, возникает задача разработки методики обоснованного выбора рабочего напряжения этих сетей с учетом таких важнейших факторов, как частота рабочего напряжения, протяженность кабельных линий, требуемый срок эксплуатации и др.

Как известно, отличительное свойство практически всех видов органической изоляции, применяемой в кабельной технике – это наличие процесса её старения при длительном воздействии высокого напряжения [72, 73]. Важнейшая характеристика этого процесса – зависимость времени до пробоя  $\tau$  от электрической прочности изоляции  $E_{p50}$  (средней пробивной напряженности электрического поля) при воздействии высокого переменного напряжения промышленной частоты 50 Гц, т.е. «кривая жизни» изоляции, для постоянного значения температуры описывается соотношением [73]:

$$\tau_{50} = B \cdot E_{P50}^{-m}, \tag{2.33}$$

где

$$E_{P50} = \frac{U_P \cdot 2}{D - d}, \qquad (2.34)$$

где *В*  $(Muh \left(\frac{B}{M}\right)^m)$  и *m* – постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально для различного типа изоляции, o.e.; U<sub>p</sub> – пробивное Β. (амплитудное значение переменного синусоидального напряжение, напряжения промышленной частоты 50 Гц); D и d – наружный диаметр изоляции внутренней токоведущей диаметр жилы коаксиального кабеля. И Μ, соответственно.

В [73] показано, что для наиболее распространённых твердых диэлектрических материалов соблюдается правило: неизменному значению произведения частоты воздействующего напряжения f и времени до пробоя соответствует неизменное значение электрической прочности  $E_{pf}$  при этой частоте:

$$f \cdot \tau = 50 \cdot \tau_{50} = const. \tag{2.35}$$

Следовательно, с учётом (2.33) для произвольного значения частоты можно записать:

$$f \cdot \tau = 50 \cdot \tau_{50} = 50 \cdot B \cdot E_{Pf}^{-m}.$$
 (2.36)

Отсюда получаем:

$$\tau = B \cdot E_{Pf}^{-m} \frac{50}{f}.$$
 (2.37)

Выражение (2.33), описывающее «кривую жизни» изоляции, удобно представить в следующем виде, позволяющем определять значение электрической прочности в зависимости от времени пробоя:

$$E_{P50} = \sqrt[m]{\frac{B}{\tau_{50}}}.$$
 (2.38)

Тогда с учётом (2.37) аналогичное выражение для произвольного значения частоты будет иметь следующий вид:

$$E_{pf} = \sqrt[m]{\frac{50B}{f\tau}}.$$
(2.39)

Учитывая (2.35), выражение (2.39) пригодно для определения электрической прочности изоляции при длительном воздействии высокого напряжения, но её нельзя использовать для оценки влияния частоты напряжения на кратковременную электрическую прочность [73].

При выборе кабельной изоляции необходимо учитывать то обстоятельство, что линейные размеры изоляции кабеля (длина кабеля l) в реальных условиях существенно превышают размеры образцов (длину образцов  $l_{OEP}$ ), использованных в экспериментах по определению постоянных коэффициентов соотношения (2.28), описывающего «кривую жизни». В этом случае изоляцию всего кабеля можно рассматривать как совокупность множества *n* изоляционных промежутков, каждый из которых имеет длину опытного образца [114]. Это приводит к увеличению вероятности пробоя изоляции кабеля реальной длины и снижению её электрической прочности согласно выражения [114]:

$$\overline{E_{pl}} = \overline{E_p}(\tau) \cdot (1 - \frac{a \cdot \sigma^*}{100}), \qquad (2.40)$$

где  $E_{pl}$  – электрическая прочность изоляции кабеля длиной  $\ell$ , В/м;  $E_p(\tau)$  – значение электрической прочности изоляции образцов В/м, использованных в опытах, для заданного срока службы;  $\sigma^*$  – это относительное значение средне квадратичного отклонения пробивных напряжений, полученное в опытах с

образцами, %; α – это безразмерный коэффициент, являющийся функцией, как будет показано ниже, длины кабеля.

Заменяя в формуле (2.40) величину  $E_p(\tau)$  на  $E_{pf}$ , с учетом выражения (2.39) получаем формулу для определения электрической прочности изоляции кабеля реальной длины  $\ell$  при произвольном значении частоты напряжения:

$$\overline{E_{pl}} = \overline{E_p}(\tau) \cdot (1 - \frac{a \cdot \sigma^*}{100}).$$
(2.41)

При переходе от характеристик электрической прочности опытных образцов к характеристикам реальных изоляционных конструкций происходит не только снижение средней пробивной напряженности, но и уменьшение среднеквадратичного отклонения согласно следующего выражения [114]:

$$\sigma_{\ell} = \beta \sigma^*, \qquad (2.42)$$

где β – безразмерный коэффициент, являющийся также, как и коэффициент α в формуле (2.40), функцией числа единичных изоляционных промежутков в составе реальной конструкции. Число этих единичных промежутков может быть определено по формуле:

$$n = \frac{\ell}{\ell}, \qquad (2.43)$$

где  $\ell_{OEP}$  – длина испытуемого участка изоляции опытного образца.

Численные значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  определяются в предположении, что функция распределения пробивных напряжений описывается нормальным законом распределения [114]. Зависимость этих коэффициентов от *n* не может быть выражена через элементарные функции.

Анализ и обработка средствами ПО MS Excel имеющихся литературных сведений по численным значениям коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , которые представлены в табл. 2.1 [114], показали, что искомые зависимости (рис. 2.5 и рис. 2.6) с высокой степенью точности могут быть представлены линиями тренда.

Число промежутков Логарифм числа промежут		α	β	
n	Ln n	α	beta	
1	0	0	1	
2	0,693147	0,55	0,81	
4	1,386294	1	0,7	
10	2,302585	1,5	0,6	
20	2,995732	1,84	0,54	
50	3,912023	2,2	0,47	
100	4,60517	2,45	0,42	
200	5,298317	2,7	0,38	
500	6,214608	3	0,35	
1000	6,907755	3,2	0,33	
10000	9,21034	3,8	0,28	



Рис. 2.5. Аппроксимация зависимости для коэффициента α формулы (2.40)

Согласно кривым аппроксимации на рис. 2.5 и рис. 2.6 получены аналитические выражения, описывающие коэффициенты α и β:

$$a = 10^{-5} \cdot \ln^{5}(n) - 7 \cdot 10^{-4} \cdot \ln^{4}(n) + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot \ln^{3}(n) - -0,117 \cdot \ln^{2}(n) + 0.863 \cdot \ln(n) + 7 \cdot 10^{-4};$$

$$\beta = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \ln^{6}(n) - 6 \cdot 10^{-4} \cdot \ln^{5}(n) + 7,2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln^{4}(n) - -0,0448 \cdot \ln^{3}(n) + 0,1528 \cdot \ln^{2}(n) - 0,3599 \cdot \ln(n) + 0,9999.$$
(2.44)

Таблица 2.1 Значения коэффициентов а и β



При выборе рабочей напряженности электрического поля в изоляции высоковольтного кабеля по формуле (2.40) для заданных значений срока службы изоляции  $\tau = \tau_{C/T}$  и длины кабеля  $\ell = \ell_K$  эксплуатационная надежность (вероятность безотказной работы) изоляции кабельной линии будет равна вероятности пробоя P=0,5 [118]. Выбор и обоснование оптимального значения этого параметра применительно к кабельным линиям и ЭТКПЧ является темой дальнейших технико-экономических исследований. В настоящее время, например, можно ориентироваться на такие характерные значения эксплуатационной надёжности, как P=0,99 и P=0,999 [118], при которых доля вышедших из строя кабельных линий к моменту истечения срока службы должна составлять 1% и 0,1%, соответственно.

В предположении, что функция распределения пробивных напряжений кабельной изоляции подчиняется нормальному закону, величина электрической прочности, соответствующая заданной эксплуатационной надёжности *P*, может быть определена по формуле [118]:

$$E_{pl}^{f}(P) = \overline{E_{pl}^{f}} \left( 1 - \frac{z \cdot \sigma_{\ell}}{100} \right), \qquad (2.46)$$

табулированной функции Лапласа [114], где Z. значение аргумента функции, соответствующее величине этой которая определяется по выражению [118]:

$$\Phi(z) = 0.5 - (1 - P) \,. \tag{2.47}$$

Например, для значений эксплуатационной надёжности *P*=0,99 и *P*=0,999 величина аргумента составляет *z* =2,34 и *z* =3,1 соответственно [118].

После подстановки выражения (2.40) в формулу (2.46) последняя с учетом выражения (2.41) приобретает вид:

$$E_{pl}^{f}(P) = \sqrt[m]{\frac{50B}{f\tau}} \cdot (1 - \frac{a \cdot \sigma^{*}}{100}) \cdot (1 - \frac{z \cdot \beta \cdot \sigma^{*}}{100}), \qquad (2.48)$$

что позволяет с использованием выражения (2.34) определить пробивное напряжение изоляции кабельной линии  $U_{pl}^{f}(P)$ , В, соответствующее заданной эксплуатационной надёжности:

$$U_{pl}^{f}(P) = E_{pl}^{f}(P) \cdot \frac{D-d}{2}.$$
 (2.49)

Вполне очевидно, что для кабельных линий в режиме эксплуатации должно выполняться соотношение [72,117]:

$$U_{\Pi P} \le U_{pl}^f(P), \qquad (2.50)$$

где расчётное значение амплитуды перенапряжений определяется по выражению [114]:

$$U_{\Pi P} = K_{\Pi P} U_{PAB}^{\max}, \qquad (2.51)$$

где  $K_{\Pi P}$  – расчетная кратность перенапряжений [114],  $U_{PAB}^{\text{max}}$  – максимальное амплитудное значение рабочего напряжения, В.

С использованием соотношений (2.48) – (2.51) получено окончательное выражение для определения максимального значения рабочего напряжения:

$$U_{PAB}^{\max} = \frac{(D-d)}{2K_{\Pi P}} \cdot \sqrt[m]{\frac{50B}{f\tau}} \cdot \left(1 - \frac{a \cdot \sigma^*}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{z \cdot \beta \cdot \sigma^*}{100}\right).$$
(2.52)

Таким образом, выражение (2.52) позволяет определить максимальное рабочее напряжение высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты, при котором срок ее службы будет не меньше расчетного при определенной эксплуатационной надежности.

# 2.3. Разработка численно-аналитической методики электротеплового расчета установившихся режимов высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты

Для определения максимальной мощности ЭТКПЧ наряду с оценкой 2.2) компонентов необходим максимального напряжения (разд. расчет предельных токовых нагрузок. Одной из важнейших характеристик работы высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты является установившийся температурный режим изоляции электропередачи, который определяет предельную величину электрического тока, протекающего по жиле кабеля [72]. Применение напряжения с нетрадиционными параметрами (частота и форма) обусловливает наличие высших гармонических составляющих в форме воздействующего напряжения на изоляцию высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты. Рабочая частота в таких электропередачах может составлять от 5 до 20 кГц, что приводит к необходимости учитывать возрастающее на несколько порядков значение диэлектрических потерь в изоляции кабеля электропередачи, а также значительное влияние на величину этих потерь различных факторов (частота напряжения, температура, напряженность электрического поля в изоляции, вид изоляционного материала и др.) [72]. В этих условиях целесообразна постановка задачи по разработке универсальной методики расчёта температурного поля в изоляции кабельной линии, которая учитывает все перечисленные выше факторы и нелинейный характер изменения различных показателей электротехнических материалов кабельной линии (удельное электрическое сопротивление материала токоведущих элементов, тангенса угла диэлектрических потерь И диэлектрической проницаемости материала изоляции, интенсивности теплоотдачи с поверхности кабеля и др.). Наличие такой методики позволит, в частности, обоснованно выбирать предельные токовые нагрузки кабельных линий повышенной частоты в различных условиях эксплуатации.

кабеля Температурное поле В изоляции определяется процессом теплопереноса В материале, который В общем случае описывается дифференциальным уравнением [72, 119]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[ a(T) \cdot \nabla T \right] + \frac{q_v}{c(T) \cdot \rho(T)}, \qquad (2.53)$$

где  $a(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T) \cdot c(T)}$  – коэффициент температуропроводности материала изоляции,  $M^2/c; \lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности, BT/(M·K); c(T) – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho(T)$  – плотность материала изоляции, кг/M<sup>3</sup> (все указанные параметры в общем случае зависят от температуры);  $\nabla = \overline{i} \frac{\partial}{\partial x} + \overline{j} \frac{\partial}{\partial y} + \overline{k} \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор Гамильтона;  $q_V$  – объемная плотность мощности тепловыделения в произвольной точке изоляции, BT/M<sup>3</sup>, которая рассчитывается по формуле [72, 120]:

$$q_{\nu} = E^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 t g \delta , \qquad (2.54)$$

где f – частота переменного рабочего (синусоидального) напряжения, Гц; E – напряженность электрического поля в этой точке (эффективное значение), В/м;  $\varepsilon_0$  Ф/м, и  $\varepsilon$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции кабеля,  $tg\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

В высоковольтных кабельных электропередачах повышенной частоты целесообразно [76, 108, 109] применение коаксиальных радиочастотных кабелей, например, РК-50 или РК-75, представляющих из себя медную жилу со слоем изоляции вокруг нее, экраном (оплеткой) и защитной оболочкой (рис. 2.7). Существуют специальные коаксиальные кабели, например, КВСП-М, со сплошным проводником или скрученным из жил, а также с обратным проводником из повива медных проволок.



Рис. 2.7. Коаксиальный кабель: 1 — токоведущая жила; 2 — изоляция; 3 — токопроводящая оплетка; 4 — защитное (диэлектрическое) покрытие; U — рабочее напряжение;  $T_{\mathcal{K}}$  и  $T_{hap}$  — температура жилы и температура поверхности оплетки кабеля в К

$$\Delta T = T_{\mathcal{K}} - T_{\mu a p} = \left(P_{\mathcal{K}} + \frac{P_{\mu 3}}{2}\right) \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_0}, \qquad (2.55)$$

где  $P_{\mathcal{K}}$  – погонное значение мощности потерь в жиле кабеля, Вт/м:

$$P_{\mathcal{K}} = R_{\mathcal{K}}I^{2} = \frac{(1+k)\rho_{20}}{F_{\mathcal{K}}} \Big[ 1 + a_{0} \left( T_{\mathcal{K}} - 293 \right) \Big] I^{2}, \qquad (2.56)$$

 $P_{\rm H3}$  – погонное значение мощности потерь в изоляции кабеля, Вт/м:

$$P_{\mu3} = U^2 2\pi f C t g \delta , \qquad (2.57)$$

погонная емкость одножильного кабеля, Ф/м, (рис. 2.7) определяется по формуле:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln\left(R/r_0\right)},\tag{2.58}$$

 $R_{\pi}$  – погонное значение активного сопротивления жилы кабеля, Ом, *R* и  $r_0$  – радиусы изоляции и жилы, м, (рис. 2.7),  $F_{\pi} = \pi r_0^2$  – площадь поперечного сечения жилы, мм<sup>2</sup>, *U* и *I* – эффективные значения рабочих напряжения, B, и тока, A, в жиле, k = 0,015....0,03 – коэффициент укрутки,  $\rho_{20}$  и  $\alpha_0$  – удельное электрическое сопротивление при температуре 293 К (20 °C) и температурный коэффициент увеличения сопротивления материала жилы (для меди:  $\rho_{20} = 0,0175 \frac{O_M \cdot MM^2}{M}$ ,  $\alpha_0 = 3,8*10^{-3}c^{-1}$ ).

Согласно [72] для подавляющего большинства высоковольтных кабелей промышленной частоты справедливо соотношение  $P_{H3} << P_{\mathcal{K}}$  и, как правило, нет необходимости учитывать величину  $P_{H3}$  при определении температурных характеристик. При использовании рабочего напряжения повышенной частоты, в сотни раз превышающей промышленную, происходит пропорциональное увеличение  $P_{H3}$  согласно (2.57), и пренебрегать влиянием этой составляющей уже недопустимо. Кроме этого, приведенные соотношения не позволяют учесть изменение различных показателей изоляционного материала.

Для получения универсального метода расчета температурного поля изоляции высоковольтных кабелей повышенной частоты целесообразно применять, как показали предварительные расчетные оценки [121], методику численного расчёта, которая иллюстрируется рис. 2.8. В этом случае объем изоляции (рис. 2.7, поз. 2) в поперечном сечении разбивается на *m* слоев (рис. 2.8), расположенных концентрически относительно жилы кабеля. Для удобства вычислений толщина слоев  $\Delta_{cn}$  выбирается одинаковой.



Рис. 2.8. Расчетная модель коаксиального кабеля,  $q_{s,m}$  – тепловой поток с поверхности кабеля (последнего слоя),  $BT/M^2$ 

В основе расчета лежит предположение, что при достаточно малой толщине слоя  $\Delta_{C\Pi}$  распространение теплового потока и температурное поле в слое будет соответствовать картине одномерного температурного поля, возникающей при распространении через плоскую стенку равномерного по площади теплового потока. Такую ситуацию можно проиллюстрировать рис. 2.9, а задача расчета температурного поля в этом случае имеет наиболее простое решение. Следует отметить, что конкретное значение  $\Delta_{C\Pi}$  определяется требуемой точностью вычислений, конструкцией и параметрами рассматриваемого объекта и может быть найдено в дальнейшем посредством численного эксперимента.



Рис. 2.9. Процесс теплопереноса через плоскую стенку
Согласно рис. 2.9 можно записать  $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$ , а уравнение (2.53) теплопереноса при a(T) = a = const, c(T) = c = const,  $\lambda(T) = \lambda = const$ ,  $\rho(T) = \rho = const$  принимает вид [25, 27]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho}.$$
(2.59)

Наибольший интерес представляет стационарный режим  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ , тогда:

$$0 = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} \,. \tag{2.60}$$

Исходя из краевых условий:  $q_s = -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial x}$  и  $T_x = T_s$  при  $x = \Delta_{CT}$ ,  $T_x = T_0$  при x = 0(рис. 2.9) и предположения, что плотность объемного тепловыделения по всему объему слоя имеет одинаковую величину  $q_v = const$ , решением уравнения (2.60) являются следующее достаточно простое выражение для определения значения температуры в произвольной точке, К, с координатой  $0 \le x \le \Delta_{CT}$  [119, 122]:

$$T_{X} = T_{S} + \frac{q_{S}}{\lambda \cdot 2 \cdot \Delta_{c\pi}} (\Delta_{c\pi}^{2} - x^{2}).$$
(2.61)

Полагая *x* = 0, из формулы (2.61) получается уравнение, которое связывает значения температуры на внешней и внутренней поверхности слоя (рис. 2.9):

$$T_0 = T_s + \frac{q_s \cdot \Delta_{cn}}{\lambda \cdot 2} \,. \tag{2.62}$$

Исходными параметрами расчета являются температура окружающего воздуха  $T_B$ , К, число слоев *m* и температура на поверхности кабеля  $T_{S,m} = T_{map}$ , К, (рис. 2.8). Это дает возможность определить толщину одного слоя:

$$\Delta_{c\pi} = \frac{(R - r_0)}{m} \,. \tag{2.63}$$

К числу исходных сведений относится также знание закона изменения во времени несинусоидального рабочего напряжения U(t), воздействующего на изоляцию кабеля, и разложения U(t) в ряд Фурье [113, 123]:

$$U(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(\omega_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t), \qquad (2.64)$$

где  $U_k$  – амплитуда k–й гармоники, B;  $f_k = kf_1 = \frac{k}{T_1}$  и  $\omega_k = 2\pi f_k$  – частота и угловая частота k–й гармоники; k = 1, 3, 5, 7... – кратность гармоники (присутствуют только нечетные гармоники, т.к. кривая напряжения симметрична относительно оси времени [113, 123]);  $f_1 = f$  – частота первой гармоники (частота воздействующего напряжения), Гц.

Кроме перечисленных выше сведений, должны быть известны зависимости  $tg\delta$  и  $\varepsilon$  изоляционного материала от температуры и частоты напряжения.

Знание амплитуды гармоники U<sub>k</sub> позволяет определить эффективное значение напряженности электрического поля этой гармоники, В/м, в любой точке изоляции коаксиального кабеля (рис. 2.8) по формуле [72]:

$$E_{k} = \frac{Q_{k}}{2\pi\varepsilon\varepsilon_{0}r} = \frac{U_{k}}{r\sqrt{2}\ln\left(\frac{R}{r_{0}}\right)},$$
(2.65)

где с учетом (2.58):

$$Q_{k} = \frac{U_{k}C}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_{0}U_{k}}{\sqrt{2}\ln\left(\frac{R}{r_{0}}\right)},$$
(2.66)

где  $Q_k$  – значение погонного электрического заряда на жиле кабеля, обусловленного напряжением соответствующей гармоники, Кл/м.

Плотность теплового потока на поверхности кабеля, Вт/м<sup>2</sup>, (последнего слоя) может быть найдена [72, 119, 121] как:

$$q_{S,m} = q_{Hap} = \alpha_{KOH} \cdot (T_{Hap} - T_B) = \alpha_{KOH} \cdot (T_{S,m} - T_B), \qquad (2.67)$$

где  $\alpha_{KOH} = 2.5 \cdot (T_{S,m} - T_B)^{0.25}$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности кабеля, Bt/(м<sup>2</sup> K).

Следует отметить, что существует некоторая неоднозначность в точном определении этого коэффициента, так как его величина зависит от нескольких факторов: температура нагретой поверхности и окружающей среды, формы нагретого объекта, его размеров, площади его поверхности, расположения нагретой поверхности, коэффициента теплопроводности нагретого материала и материала окружающей среды, теплоемкости этих материалов, скорости и характера движения окружающей среды и др. [72, 119, 121]. Формула (2.67) фактически позволяет оценивать усредненное значение  $q_{s,m}$ . Одним из дальнейших направлений исследований могло бы явиться, по-видимому, устранение этой неоднозначности применительно к кабельным линиям высокого напряжения различной конструкции и различным условиям их эксплуатации.

Полагая, что в пределах одного слоя  $\Delta_{cn}$  (например, *m*-го слоя, рис. 2.8) объемная плотность мощности тепловыделения, Bт/м<sup>3</sup>, имеет одинаковую величину, ее значение для напряжения *k*-ой гармоники разложения по (2.64), исходя из соотношений исходя из соотношений (2.54) и (2.65), можно определить по формуле:

$$q_{vk,m} = \left(\frac{U_k C}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_m \sqrt{2}}\right)^2 2\pi f \varepsilon\varepsilon_0 tg \delta = \left(\frac{U_k}{r_m \sqrt{2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}\right)^2 2\pi f \varepsilon\varepsilon_0 tg \delta = \left(\frac{U_k}{r_m \sqrt{2} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}\right)^2 2\pi f \varepsilon\varepsilon_0 tg \delta dz$$

$$(2.68)$$

$$=\frac{\left(\frac{\sqrt{\sqrt{2}}\right)^{-2\pi}J_{k}\varepsilon_{k,m}\varepsilon_{0}lgO_{k,m}}}{r_{m}^{2}\left(\ln\frac{R}{r_{0}}\right)^{2}}=\frac{U_{k}^{2}\pi f_{k}\varepsilon_{k,m}\varepsilon_{0}lgO_{k,m}}{r_{m}^{2}\left(\ln\frac{R}{r_{0}}\right)^{2}}=const,$$

где  $r_m = R - \frac{\Delta_{C\Pi}}{2}$  – среднее значение радиуса слоя (рис. 2.8),  $tg \delta_{k,m}$  и  $\mathcal{E}_{k,m}$  – значения тангенса диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости изоляции, соответствующие частоте *k*-ой гармоники и температуре *m*-го слоя.

Одновременно можно предположить, что при малой толщине слоя  $\Delta_{CT}$  процесс теплопереноса соответствует картине, представленной на рис. 2.9. Это дает основание вычислить температуру в начале последнего слоя, К, (т.е. в конце предпоследнего слоя) с помощью формулы (2.62):

$$T_{O,m} = T_{S,m-1} = T_{S,m} + \frac{q_{S,m} \cdot \Delta_{C\mathcal{I}}}{\lambda \cdot 2}, \qquad (2.69)$$

а также можно определить среднее значение температуры в слое:

$$\overline{T}_{m} = \frac{T_{O,m} + T_{S,m}}{2}.$$
(2.70)

Из (2.69) и (2.70) можно сделать вывод, что будет справедливо соотношение  $T_{0,m} \ge \overline{T}_m \ge T_{s,m}$ , т.е. среднее значение температуры соответствует точке на оси x (рис. 2.9), расположенной приблизительно посередине участка от x=0 до  $x=\Delta_{cn}$ .

По известным зависимостям [124] определяются  $tg\delta_{k,m} = f(\overline{T}_m; f_k)$  и  $\varepsilon_{k,m} = f(\overline{T}_m; f_k)$ , вычисляется  $q_{vk,m}$  с использованием формулы (2.68), что позволяет определить мощность диэлектрических потерь *k*-ой гармоники в слое в расчете на единицу длины кабеля (*l*=1 м), Вт/м, следующим образом:

$$q_{k,m} = q_{vk,m} V_m = 2\pi r_m \Delta_{C\Pi} q_{vk,m} = \frac{U_k^2 2\pi^2 \Delta_{C\Pi} f_k \varepsilon_{k,m} \varepsilon_0 tg \delta_{k,m}}{r_m \left(\ln \frac{R}{r_0}\right)^2}, \qquad (2.71)$$

причем объем рассматриваемого слоя (соответствует *l*=1 м) определяется как:

$$V_m = 2\pi r_m \Delta_{CJ} \ell . \tag{2.72}$$

Полная мощность диэлектрических потерь в *m*-м слое, Вт/м, определяется суммированием по всем гармоникам:

$$q_m = \sum_{k=1}^{\infty} q_{k,m} .$$
 (2.73)

При стационарном температурном состоянии высоковольтного кабеля вся мощность, определяемая соотношением (2.73), будет участвовать в общем тепловом потоке, идущем от жилы кабеля к его оболочке и далее в окружающую среду за счет теплоотдачи с поверхности согласно (2.67). Это означает, что плотность теплового потока на поверхности следующего, (*m*-1)-го, слоя,  $BT/m^2$ , будет меньше на величину, определяемую мощностью диэлектрических потерь в *m*-ном слое, и может быть вычислена по формуле:

$$q_{S,m-1} = q_{S,m} - \frac{q_m}{F_m} = q_{S,m} - \frac{q_m}{2\pi r_m}, \qquad (2.74)$$

где площадь поверхности *m*-го слоя в расчете *l*=1 м:

$$F_m = 2\pi r_m \ell = 2\pi r_m \,. \tag{2.75}$$

Это позволяет по аналогии с формулами (2.69) и (2.70) определить уже температуру на следующей границе между слоями (рис. 2.8) и среднюю температуру слоя, К:

$$T_{O,m-1} = T_{S,m-2} = T_{S,m-1} + \frac{q_{S,m-1} \cdot \Delta_{CT}}{\lambda \cdot 2} \overline{T}_{m-1} = \frac{T_{O,m-1} + T_{S,m-1}}{2}.$$
 (2.76)

Дальнейшие вычисления при последовательном изменении номера слоя от i=m-1 до i=1 выполняются с использованием однотипных соотношений, которые можно записать на основании рассмотренных выше формул. Например, с учетом (2.69) – (2.76) значение плотности теплового потока на поверхности двух соседних слоев, Вт/м<sup>2</sup>, связаны соотношением:

$$q_{S,i-1} = q_{S,i} - \frac{\Delta_{CJ} \varepsilon_0 \pi \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2 f_k \varepsilon_{k,i} \cdot tg \delta_{k,i}}{r_i^2 \left( \ln \frac{R}{r_0} \right)^2}, \qquad (2.77)$$

где среднее значение радиуса слоя:

$$r_i = r_m - \Delta_{CJI}(m - i) . \tag{2.78}$$

Используя выражения (2.68), (2.69) и (2.76), нетрудно записать общие выражения для определения значений температуры в произвольном слое, К, (рис. 2.8):

$$T_{O,i} = T_{S,i-1} = T_{S,i} + \frac{q_{S,i} \cdot \Delta_{C\mathcal{I}}}{\lambda \cdot 2}, \overline{T}_i = \frac{T_{O,i} + T_{S,i}}{2}.$$
(2.79)

Результатом расчетов являются значение плотности теплового потока на поверхности жилы кабеля  $q_{\mathcal{K}f}$ , которое определяется на последнем шаге вычислений по формуле (2.77) при *i*=1, а также два массива значений размерностью *m*+2, состоящих из массива средних значений температуры (2.79) в слое  $\overline{\tau}_i$  и соответствующего ему массива радиусов (2.78) размерностью *m*. Два остальных члена каждого массива – температура и ее координата на поверхности жилы ( $T_{0,1}=T_{\mathcal{K}};r_0$ ), а также температура и ее координата на поверхности кабеля ( $T_{S,m};R$ ). Эти массивы, кроме сведений о точных значениях температуры в различных точках изоляции кабеля, позволяют графически представить изменение

температуры в поперечном сечении кабеля (рис. 2.7) в установившемся режиме работы.

Указанные результаты расчета позволяют находить один из важнейших рабочих параметров высоковольтного кабеля – предельно допустимые значения электрического тока  $I_{max}$ , А, в жиле кабеля, которые обычно определяются предельно допустимым нагревом изоляции в точке с наивысшим значением температуры, К, расположенной на поверхности жилы ( $T_{\mathcal{K}}^{max}$ ) [72]. Плотность теплового потока, исходящего с поверхности жилы в этом случае, можно выразить через величину погонной мощности потерь, Вт/м, (2.56) в активном сопротивлении проводника:

$$q_{\mathcal{K}f}^{\max} = \frac{P_{\mathcal{K}f}^{\max}}{F_0} = \frac{R_{\mathcal{K}} \cdot I_{\max}^2}{F_0} = \frac{R_{\mathcal{K}} \cdot I_{\max}^2}{2\pi r_0}, \qquad (2.80)$$

где  $F_0 = 2\pi r_0 \ell$  – площадь поверхности проводника (жилы) в расчете на единицу его длины l=1 м.

Поскольку значение  $q_{\mathcal{K}f}^{\max}$  есть результат вычислений по формуле (2.77) для *i*=1 при условии  $T_{0,1} = T_{\mathcal{K}}^{\max}$  в (2.79), с использованием (2.80) и (2.56) получено следующее выражение для определения эффективного значения максимально допустимого тока, А:

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{F_0 q_{\mathcal{H}f}^{\max}}{R_{\mathcal{H}}}} = \sqrt{\frac{F_0 F_{\mathcal{H}} q_{\mathcal{H}f}^{\max}}{(1+k) \cdot \rho_{20} \cdot [1+\alpha_0 (T_{\mathcal{H}}^{\max} - 20)]}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 r_0^3 q_{\mathcal{H}f}^{\max}}{(1+k) \cdot \rho_{20} \cdot [1+\alpha_0 (T_{\mathcal{H}}^{\max} - 20)]}}}$$
(2.81)

При эксплуатации высоковольтной кабельной линии повышенной частоты с несинусоидальным характером изменения во времени необходимо обеспечивать выполнение условия:

$$I_f \le I_{\max}, \tag{2.82}$$

где эффективное значение электрического тока в такой линии, A, с учетом (2.31) и (2.32) согласно [113, 123] определяется суммированием эффективных значений гармоник тока из соотношения:

$$I_f = \sqrt{\sum_{k=1}^{N} I_{kj}^2} , \qquad (2.83)$$

где *j* – индекс тока в кабельной линии согласно рис. 2.4.

Представляет интерес сравнение значения, полученного из (2.81), с величиной допустимого тока при использовании синусоидального напряжения промышленной частоты 50 Гц. Поскольку в этом случае  $P_{H3} \ll P_{\mathcal{K}}$ , с учетом (2.55) и (2.67) можно записать:

$$P_{\mathcal{K}} = P_{_{Hap}} = q_{_{Hap}}F = q_{_{Hap}}2\pi R\ell = \alpha_{_{KOH}} \cdot (T_{_{Hap}} - T_{_B})2\pi R =$$
  
= 2.5 \cdot (T\_{\_{S,m}} - T\_{\_B})^{0.25} \cdot (T\_{\_{Hap}} - T\_{\_B})2\pi R = 5\pi R(T\_{\_{Hap}} - T\_{\_B})^{1.25}, (2.84)

где  $F = 2\pi R \ell = 2\pi R$  (*l*=1 м) – площадь поверхности кабеля в расчете на единицу длины кабеля.

Из формул (2.55) и (2.84) можно получить выражение для определения температуры жилы кабеля, К:

$$T_{\mathcal{K}} = \frac{P_{\mathcal{K}}}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) + T_B + \left(\frac{P_{\mathcal{K}}}{5\pi R}\right)^{0.8}.$$
(2.85)

Полагая в (2.85)  $T_{\mathcal{H}} = T_{\mathcal{H}}^{\max}$ ,  $P_{\mathcal{H}} = P_{\mathcal{H}}^{\max}$  из этого выражения получаем:

$$P_{\mathcal{K}}^{\max} = \frac{2\pi \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \left[ T_{\mathcal{K}}^{\max} - T_B - \left(\frac{P_{\mathcal{K}}^{\max}}{5\pi R}\right)^{0.8} \right]$$
(2.86)

Используя формулу (2.86) можно посредством итерационных вычислений определить значение  $P_{\mathcal{K}}^{\max}$ , соответствующее применению напряжения промышленной частоты. Далее с помощью формулы (2.81) после замены в ней  $q_{\mathcal{K}f}^{\max}$  на полученное  $P_{\mathcal{K}}^{\max}$  вычисляется предельно допустимое эффективное значение переменного синусоидального тока промышленной частоты  $I_{\max}^{50}$ .

# 2.4. Разработка методики расчета параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

## 2.4.1. Разработка методики расчета и выбора элементов силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Для анализа физических процессов, происходящих в ЭТКПЧ, содержащем высоковольтные силовые трансформаторы повышенной частоты, необходимо выполнить моделирование всего комплекса. Для составления математической модели ЭТКПЧ и ее применения при различной форме питающего напряжения (глава 2.1) [111, 131] необходимо использовать Т-образную схему замещения силового трансформатора повышенной частоты [125, 131]. Однако для уточнения конструктивного исполнения трансформаторов предварительно стоит рассмотреть методику расчета самих высоковольтных трансформаторов повышенной частоты.

Технологический процесс обусловливает рабочую частоту ЭТКПЧ (рис. 2.1) в пределах 5–20 кГц [17, 18, 25, 28, 29], и для таких установок потребуются трансформаторы с ферритовым магнитопроводом. В этом случае трансформатор выполняется однофазным двухобмоточным (по одной обмотке низкого и высокого напряжения) с сухой изоляцией и без корпуса. Анализ существующих методов расчета трансформаторов повышенной частоты [2, 33, 125, 130] показал, что они не удовлетворяют в полной мере потребностям конструирования электротехнических комплексов нового поколения. Тем не менее, эти методы могут быть приняты в качестве основы для составления более строгой и актуальной методики расчета конструктивных параметров и показателей такого оборудования.

Для расчета такого трансформатора должны быть заданы основные параметры силового трансформатора – первичное напряжение  $U_1$ , вторичное напряжение  $U_2$ , номинальная мощность –  $P_{HOM}$ , рабочая частота f, параметры, характеризующие материал используемого сердечника трансформатора – магнитная проницаемость и предельная индукция магнитного поля  $\mu$  и  $B_m$ .

Предполагается также, что при создании ЭТКПЧ вместо единичного трансформатора возможно использование нескольких трансформаторов,

работающих по каскадной схеме включения, например, при параллельном включении обмоток со стороны низкого напряжения или последовательном соединении обмоток на стороне высокого напряжения. Поэтому параметры единичного трансформатора зависят от числа трансформаторов  $n_m$ , входящих в состав такой каскадной схемы, т.е. номинальная мощность единичного трансформатора  $P_{HOMT}$  и номинальное напряжение вторичной обмотки  $U_{2TP}$  определяются из соотношений:

$$P_{HOMT} = \frac{P_{HOM}}{n_m}; U_{2TP} = \frac{U_2}{n_m}.$$
 (2.87)

Анализ возможных вариантов конструктивного выполнения магнитопровода трансформаторов повышенной частоты [1, 2, 33, 110] показывает, что для электроэнергетических установок с повышенной частотой рабочего напряжения наиболее целесообразным является применение ферритового магнитопровода Шобразной конструкции. Выбор конструкции магнитопровода и определение его параметров производится с применением неравенства [2, 33, 110]:

$$(S_0 \cdot S_C)_{CT} \ge (S_0 \cdot S_C)_{PACY}, \qquad (2.88)$$

где  $S_0$  – площадь окна с обмоткой в сердечнике,  $S_c$  – площадь поперечного сечения среднего стержня магнитопровода. Левая часть формулы  $(S_0S_c)_{cm}$  – это параметр, определяемый из справочных данных сердечника, правая часть формулы  $(S_0S_c)_{pacy}$  – расчетный параметр,  $cM^4$ , определяемый по формуле [2, 33, 110]:

$$\left(S_{0} \cdot S_{C}\right)_{PACY} = \left(\frac{P_{HOMT} \cdot 10^{4}}{4 \cdot k_{\phi} \cdot k_{J} \cdot k_{H} \cdot B_{M} \cdot f}\right)^{\frac{1}{1+y}},$$
(2.89)

1

где f – частота рабочего напряжения,  $B_{M}$  – максимальное значение индукции магнитного поля в магнитопроводе,  $k_{\Phi}$ ,  $k_{J}$ ,  $k_{U}$  – обмоточные коэффициенты, y – безразмерный показатель. Коэффициент  $k_{\Phi}$  учитывает влияние формы осциллограммы напряжения на первичной обмотке трансформатора. В [2, 33] приводятся следующие значения этого коэффициента:  $k_{\Phi} = 1$  – для симметричной прямоугольной формы,  $k_{\Phi} = 1,11$  – для синусоидальной формы. Коэффициент использования окна  $k_{U}$  принимается равным  $k_{U} = 0,4$  [2, 33]. Коэффициент  $k_{J}$  имеет размерность плотности тока (A/cm<sup>2</sup>) и зависит от заданной геометрии

сердечника (манитопровода) трансформатора и перегрева поверхности сердечника  $\Delta T$  (определяется как разность температуры на поверхности магнитопровода и температуры окружающей среды). Численное значение безразмерного показателя степени у в формуле (2.89) зависит от конструктивного выполнения ферритового сердечника, используемого в качестве магнитопровода трансформатора, например, для Ш-образных сердечников промышленного изготовления y = -0,12 [2]. Значения  $k_J$  и у для различных геометрии сердечников и значений перегрева  $\Delta T$  приведены в [2].

На основании результатов расчета по формуле (2.89) с учетом условия (2.88) выбирается наиболее подходящий ферритовый сердечник из числа выпускаемых промышленностью, а также их число  $n_C \ge 1$  в составе магнитопровода одного трансформатора.

В результате выбора сердечника (рис. 2.10) становятся известны его геометрические параметры: H –высота половины сердечника, L – длина сердечника,  $S = S_C$  – площадь поперечного сечения среднего стержня магнитопровода,  $l_0$  – ширина среднего стержня, b – толщина сердечника,  $l_W$  и h – длина и высота окна сердечника соответственно.

Знание геометрических параметров выбранного Ш-образного сердечника (рис. 2.10) позволяет определить тепловую поверхность [2] магнитопровода как площадь его поверхности за исключением той части, которая закрыта обмоткой:

$$S_T = 2 \cdot (H \cdot L + 2 \cdot H \cdot S + S \cdot L + 2 \cdot l_W \cdot (l_0 + 2 \cdot l_W + 2 \cdot h)) + (4H \cdot b + 2L \cdot b)(n_C - 1).$$
(2.90)

На основании геометрических размеров выбранного сердечника можно определить среднюю длину витка  $l_{CPB}$  обмоток трансформатора с учетом количества сердечников, из которых будет состоять магнитопровод:

$$l_{CPB} = l_{CPB1} + 2 \cdot b \cdot (n_C - 1), \qquad (2.91)$$

где *l*<sub>*СРВ1</sub> – средняя длина единичного витка при использовании одного сердечника в трансформаторе, которую согласно конструкции сердечника (рис. 2.10) можно оценить по формуле:</sub>* 

$$l_{CPB1} = 2(l_0 + 2l_W + b).$$
(2.92)



Рис. 2.10. Конструкция и геометрические параметры Ш-образного ферритового сердечника

Приведенные выше геометрические параметры (рис. 2.10) позволяют вычислить объем материла (феррита), из которого выполнен магнитопровод трансформатора:

$$V_C = 2n_C (HLb - 2bhl_W).$$
(2.93)

Масса магнитопровода может быть найдена как:

$$M_C = V_C \cdot \gamma_{\phi} \,, \tag{2.94}$$

где  $\gamma_{\Phi}$  – плотность феррита.

Число витков первичной (низковольтной) обмотки трансформатора определяется согласно [2] по формуле:

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4 \cdot k_{\phi} \cdot B_m \cdot f \cdot S_C}, \qquad (2.95)$$

где  $S_C$  должно быть выражено в  $c M^2$ .

Величина тока в первичной (низковольтной) обмотке при номинальной мощности определится из соотношения [2]:

$$I_1 = \frac{P_{HOMT}}{U_1 \cdot \eta}, \qquad (2.96)$$

 $\eta = 0.97...0.99$  – значение КПД трансформатора, принимаемое на стадии расчета.

Требуемое значение плотности тока проводниках обмоток трансформатора определяется с использованием коэффициентов *k*<sub>1</sub> и *y* по формуле [2]:

$$j = k_J (S_0 \cdot S_C)^{y} . (2.97)$$

Тогда можно определить необходимое значение поперечного сечения провода первичной обмотки [2]:

$$S_{np1} = \frac{k_2 \cdot I_1}{j},$$
 (2.98)

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий вариант выполнения обмоток трансформатора. Согласно [2]  $k_2 = 1$  при включении обмоток в соответствии с рис. 2.11, а и  $k_2 = 1/\sqrt{2}$ при использовании схемы включения обмоток в соответствии с рис. 2.11, б.



Рис. 2.11. Типовые схемы включения трансформатора в преобразователях

Как было указано выше (раздел 2.1), в ЭТКПЧ используется несинусоидальное напряжение с частотой от 5 до 20 кГц, что делает необходимым учитывать явление скин-эффекта в проводниках обмоток трансформатора. Выбор конструкции и параметров проводов как первичной, так и вторичной обмоток силового трансформатора повышенной частоты должен обязательно производится с учетом величины эквивалентной глубины проникновения электромагнитного поля в толщу металла обмотки (медный проводник), которая может быть оценена по формуле [110, 112]:

$$b_m = 1000 \cdot \sqrt{\frac{\rho_M}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}}, \qquad (2.99)$$

где  $\rho_{M}$  – удельное сопротивление материала, из которого выполняется обмотка трансформатора (медь);  $\mu$  и  $\mu_{0} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_{H}}{M}$  – относительная магнитная проницаемость материала обмотки (меди) и магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума). Для снижения потерь, обусловленных скин-эффектом и эффектом близости, диаметр проводника первичной обмотки  $d_{max}$  должен быть меньше удвоенного значения эквивалентной глубины проникновения электромагнитной волны [110, 112]:

$$d_{max} \le 2b_m = 2000 \cdot \sqrt{\frac{\rho_M}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}} \,. \tag{2.100}$$

Как показали предварительные оценки, при использовании несинусоидального напряжения с частотой от 5 до 20 кГц эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны оказывается небольшой, и сечение провода диаметром  $d_{max}$  нередко оказывается значительно меньше требуемого значения, определяемого выражением (2.98), т.е.  $S_{IIP1}^{max} = \frac{\pi d_{max}^2}{4} \ll S_{IIP1}$ . Поэтому проводник обмотки целесообразно выполнять состоящим из параллельно соединенных одинаковых проводов диаметром  $d_{IIP1} < d_{max}$  (выбирается по каталогам производителей такой продукции) в количестве  $n_{IIP1}$ . При этом необходимо обеспечить равенство суммарного поперечного сечения всех проводов расчетному значению (2.98), т.е.

$$S_{\Pi P1} \cong \frac{\pi d_{\Pi P1}^2}{4} n_{\Pi P1} \,. \tag{2.101}$$

При изготовлении провода обмотки весьма желательно применение специального переплетения входящих в его состав проводников с целью обеспечения им одинаковых условий работы, например, литцендратного переплетения [126, 127].

Знание параметров магнитопровода (рис. 2.10), обмоточных параметров (2.95), конструкции провода обмотки ( $n_{\Pi P1}, d_{\Pi P1}$ ) позволяет оценить величину активного сопротивления первичной обмотки:

$$R_{1} = \frac{4l_{CPB}w_{1}\rho_{M}}{n_{np1}\pi d_{\Pi P1}^{2}}.$$
(2.102)

Это дает возможность определить мощность потерь в активном сопротивлении (в меди) первичной обмотки [2, 33, 110]:

$$\Delta P_{_{\mathcal{M}1}} = k_3 \cdot (k_2 \cdot I_1)^2 \cdot R_1, \qquad (2.103)$$

где  $k_3 = 1$  при включении обмоток в соответствии с рис. 2.11, а и равный 2 при использовании схемы рис. 2.11, б.

Число витков вторичной обмотки определяется с учетом падения напряжения  $\Delta U_T$  на одном транзисторе при нахождении транзистора в открытом состоянии [2, 110]:

$$w_{2} = \frac{W_{1} \cdot (U_{2} + k_{1} \cdot \Delta U_{T})}{U_{1}}$$
(2.104)

Очевидно, что величина тока во вторичной (высоковольтной) обмотке трансформатора при номинальной передаваемой мощности будет равна значению тока, протекающего через нагрузку, подключенную к зажимам этой обмотки:

$$I_2 = I_H = \frac{P_{HOMT}}{U_2} \,. \tag{2.105}$$

Требуемое значение поперечного сечения провода вторичной обмотки определяется как [2, 110]:

$$S_{np2} = \frac{k_4 \cdot I_2}{j}, \qquad (2.106)$$

где  $k_4$  – коэффициент учитывающий вариант выполнения обмоток трансформатора:  $k_4=1$  для схемы согласно рис. 2.11, а и  $k_4=1/\sqrt{2}$  для схемы рис. 2.11, б [2].

Конструкция провода вторичной (высоковольтной) обмотки выбирается таким образом, как и первичной, с соблюдением по аналогии с (2.101) следующего условия:

$$S_{\Pi P2} \cong \frac{\pi d_{\Pi P2}^2}{4} n_{\Pi P2},$$
 (2.107)

где  $n_{\Pi P2}$  и  $d_{\Pi P2} \leq d_{\max}$  – число одинаковых, параллельно включенных, проводов и их диаметр, выбранный по каталогам производителей обмоточных проводов.

По аналогии с (2.102) и (2.103) определяется значение активного сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{4l_{CPB}w_2\rho_M}{n_{p2}\pi d_{IP2}^2}$$
(2.108)

и мощность потерь энергии в этом активном сопротивлении:

$$\Delta P_{_{M2}} = k_5 \cdot (k_4 \cdot I_1)^2 \cdot R_1, \qquad (2.109)$$

где  $k_5=1$  для схемы рис. 2.11, а и  $k_5=2$  при использовании схемы рис. 2.11, б [2].

Суммарные потери мощности в меди трансформатора складываются из потерь мощности в первичной и вторичной обмотках:

$$\Delta P_{_{\mathcal{M}}} = \Delta P_{_{\mathcal{M}1}} + \Delta P_{_{\mathcal{M}2}} \,. \tag{2.110}$$

Как известно, второй составляющей потерь электроэнергии в силовых трансформаторах являются потери на гистерезис и вихревые токи в материале магнитопровода. В случае использования в конструкции трансформатора ферритового сердечника, предназначенного для работы на частотах от 10 до 50 кГц, величина удельных потерь мощности такого вида может быть оценена по формуле, Вт/кг, [2, 128]:

$$P_{YJI} = 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1.31} \cdot B_m^{2.49}, \qquad (2.111)$$

гдеf-в Гц,  $B_m$ -в Тл.

Знание удельных потерь мощности позволяет определить полную мощность потерь в сердечнике на гистерезис и вихревые токи:

$$\Delta P_C = P_{\mathcal{V}\mathcal{I}} \cdot M_C \,. \tag{2.112}$$

Мощность потерь в трансформаторе определяются суммированием мощности потерь в меди трансформатора и мощности потерь в сердечнике на гистерезис и вихревые токи:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{_{\mathcal{M}}} + \Delta P_{_{\mathcal{C}}}.$$
(2.113)

Зная величину потерь мощности, нетрудно определить КПД трансформатора [110]:

$$\eta_m = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{HOMT}}.$$
(2.114)

При оценке технико-экономической эффективности ЭТКПЧ требуется определение удельных массогабаритных показателей силовых трансформаторов, входящих в его состав. Поэтому кроме массы магнитопровода (2.94) необходимо также знание массы обмоточного провода  $M_{np}$ , которую можно определить как произведение объема меди на ее плотность  $\gamma_m$ :

$$M_{np} = l_{CPB} \left( \frac{\pi d_{\Pi P1}^2}{4} n_{\Pi P1} w_1 + \frac{\pi d_{\Pi P2}^2}{4} n_{\Pi P2} w_2 \right) \gamma_m .$$
(2.115)

В условиях серийного применения силовые трансформаторы повышенной частоты целесообразно выполнять без корпуса, сухим с литой изоляцией. В качестве изоляционного материала, повышающего электрическую прочность между обмотками и между витками может быть применена эпоксидная смола [129]. Поэтому требуется определение и массы изоляции  $M_{_{H3}}$ :

$$M_{H3} = \frac{M_{np}}{k_{H}} = \frac{l_{CPB}}{k_{H}} \left( \frac{\pi d_{\Pi P1}^{2}}{4} n_{\Pi P1} w_{1} + \frac{\pi d_{\Pi P2}^{2}}{4} n_{\Pi P2} w_{2} \right) \gamma_{\Im \Pi OKC}, \qquad (2.116)$$

где  $k_{\mu}$  – коэффициент заполнения изоляцией промежутков между витками и обмотками [9],  $\gamma_{3локс}$  – плотность эпоксидной изоляции.

Общая масса трансформатора  $M_T$  вычисляется суммированием всех составляющих:

$$M_T = M_C + M_{IIP} + M_{II3}. (2.117)$$

Поскольку трансформатор не имеет корпуса его объем можно оценить, как объем параллепипеда, в границы которого вписывается конструкция трансформатора (рис. 2.10):

$$V_T = L \cdot H \cdot (b \cdot n_C + 2 \cdot l_0). \tag{2.118}$$

При известных значениях массы и объема силового трансформатора можно определить его удельную массу, т.е. массу в расчете на единицу его номинальной мощности:

$$m_0 = \frac{M_T}{P_{HOMT}}, \qquad (2.119)$$

и его удельный объем:

$$V_0 = \frac{V_T}{P_{HOMT}} \,. \tag{2.120}$$

Пример расчета трансформатора на 4 кВА согласно указанной методике приведен в Приложении А.

Представленная выше методика позволяет определить наиболее значимые параметры конструктивного выполнения силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты для определения параметров его схемы замещения и определения технико-экономических показателей.

### 2.4.2. Методика определения емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Для составления математической модели ЭТКПЧ и моделирования физических процессов, происходящих в нем, необходимо знание, в том числе параметров схемы замещения трансформаторов повышенной частоты. Знание емкостных и индуктивных параметров обмоток силовых трансформаторов повышенной частоты (5–20 кГц) необходимо для составления схем замещения при исследовании процессов, протекающих в обмотках таких трансформаторов [125] и в составе ЭТКПЧ, с применением различных форм осциллограммы ЭДС преобразователя напряжения (раздел 2.1) [111].

Согласно литературным источникам существуют разнообразные методики расчета элементов трансформаторов и их схемы замещения. Например, в [33] приводится методика проектирования и расчета высоковольтных импульсных трансформаторов, предназначенных для получения импульсов высокого напряжения с требуемыми параметрами, имеющих сравнительно небольшую мощность и отличающаяся применением обмоток слоевой конструкции. Однако практически отсутствуют сведения о расчете параметров схемы замещения для обмоток катушечной конструкции. В [130] производится расчет параметров трансформаторов преимущественно промышленной частоты, но при этом отсутствует в явном виде методика расчета параметров схемы замещения. Справочные данные типовых силовых трансформаторов примышленной частоты,

приведенные в [131], почти не содержат информации о параметрах схемы замещения трансформаторов и методах их непосредственного расчета. Несмотря на глубокую разработку методов расчета электрической емкости разнообразных задач электротехники в [132], они оказываются практически непригодными для определения емкостных параметров схемы замещения силовых трансформаторов повышенной частоты, так как не учитывают распределение потенциала по поверхности электродов, образующих соответствующие емкости (что имеет место конструкции обмоток трансформаторов). Перечисленные выше В методы определения индуктивных и емкостных параметров лишь частично применимы расчете высоковольтных трансформаторов повышенной частоты, при предназначенных для использования в ЭТКПЧ.

Произведенные вычисления по методикам авторов в [33, 125, 130, 131, 132], а также наиболее близкой методики расчета изложенной в [2] показали малую сходимость расчетных и экспериментальных результатов существующих методов расчета параметров схем замещения как импульсных трансформаторов, так и трансформаторов промышленной частоты с результатами опытного определения параметров трансформаторов повышенной частоты.

Предварительный опыт изготовления и испытания силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты показал, что большое практическое значение имеет знание емкостных и индуктивных параметров высоковольтной обмотки (емкость относительно земли, емкость между слоями, емкость между секциями, индуктивности рассеяния отдельных секций, а также всей обмотки и т.д.), одновременно было установлено, что для таких трансформаторов предпочтительной является конструкция с применением слоевой намотки для первичной обмотки и катушечной для вторичной (высоковольтной). При этом также было получено подтверждение известных представлений о необходимости максимального уменьшения величины емкостных и индуктивных параметров обмотки высоковольтной трансформаторов силовых высоковольтных повышенной частоты.

На рис. 2.12 схематично представлен один из наиболее реальных вариантов конструктивного выполнения силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты.



Рис. 2.12. Конструкция высоковольтного силового трансформатора: 1 – Ш-образный ферритовый магнитопровод; 2 – слоевая обмотка низкого напряжения; 3 – катушечная обмотка высокого напряжения, состоящая из 5-ти катушек (секций); 4 – стенки каркаса; 5 – изоляция между обмотками высокого и низкого напряжения; 6 – изоляционные прокладки между секциями высоковольтной обмотки

Трансформатор представляет собой двухобмоточный по 2.12 рис. трансформатор, который состоит из Ш-образного ферритового сердечника, изоляционного каркаса, первичной и вторичной обмоток. Первичная обмотка расположена ближе к стержню магнитопровода и выполняется с однослойным типом намотки. Поверх первичной обмотки располагается изоляция между первичной и вторичной обмотками трансформатора. За слоем изоляции расположена вторичная (высоковольтная) катушечная обмотка. Для уменьшения её емкостей и индуктивностей рассеяния она разделена на пять секций (катушек), которые соединены между собой последовательно. Картонный каркас с обмотками пропитан парафином (использовался в опытных образцах) или другим ИЗОЛЯЦИОННЫМ материалом (эпоксидная смола) с целью повышения

электрической прочности. На рис. 2.13 представлен разрез обмотки такого трансформатора.



Рис. 2.13. Разрез обмоток силового трансформатора повышенной частоты. Секции ВН и НН – секции обмоток высшего и низшего напряжения трансформатора

На рис. 2.14 представлена электрическая схема обмоток трансформатора с указанием электрических емкостей, которые необходимо определять расчетным способом (электрическая схема замещения представлена межкатушечными, слоевыми емкостями и емкостями на землю).



Рис. 2.14. Схема распределения емкостей в обмотке трансформатора повышенной частоты:  $U_2$  – напряжение вторичной (высоковольтной) обмотки трансформатора,  $U_1$  – напряжение первичной (низковольтной) обмотки трансформатора,  $C_{12}$ ,  $C_{2j}$  – межкатушечная емкость вторичной обмотки,  $C_{cn}$  – слоевая емкость в катушке вторичной обмотки,  $C_{1-3}$ ,  $C_{2-3}$ ,  $C_{i-3}$  – емкость катушки вторичной обмотки относительно земли

Для определения емкости был использован метод, основанный на оценке запасенной энергии электрического поля в изоляции, который позволил получить расчетные соотношения для определения емкостных параметров обмоток импульсных трансформаторов слоевой конструкции [33]. Для заданной конструкции трансформатора (рис. 2.12) при определении емкости верхней по схеме секции относительно обмотки низкого напряжения (С<sub>1-3</sub>) используя

$$dC_{13x} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l_{CPB}}{\Delta_3} dx, \qquad (2.121)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$  – абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемости изоляции;  $l_{CPB}$  – средняя длина витка;  $\Delta_3$  – толщина изоляции между низковольтной и высоковольтной обмотками. Энергия электрического поля в элементарной емкости (2.121) может быть найдена следующим образом:

$$dW_{1-3} = \frac{dC_{1-3}U_x^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 l_{CPB}U_x^2}{2\Delta_3},$$
(2.122)

где  $U_x$  – величина напряжения на этой емкости, т.е. разность потенциалов между высоковольтной и низковольтной обмотками в точке с координатой х (рис. 2.13) в предположении, что низковольтная обмотка имеет нулевой потенциал (заземлена) (рис. 2.14).

Анализ распределения напряжений по секциям и слоям секций (рис. 2.14) позволяет сделать вывод, что изменение напряжения вдоль изоляционного зазора между обмотками при изменении x от 0 до h будет описываться следующим соотношением:

$$U_{x} = \frac{(n_{CO} - 1)U_{2}}{n_{CO}} + \frac{xU_{2}}{hn_{CO}m} = \frac{U_{2}}{n_{CO}} \left( (n_{CO} - 1) + \frac{x}{hm} \right),$$
(2.123)

где  $n_{CO}$  – число секций высоковольтной обмотки; m – число слоев обмотки в одной секции; h – высота секции в сечении (рис. 2.14). Энергия электрического поля в рассматриваемом зазоре определяется интегрированием выражения (2.122) с учетом (2.123):

$$W_{1-3} = \int_{x=0}^{h} dW_{1-3} = \int_{x=0}^{h} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l_{CPB} U_x^2}{2\Delta_3} dx = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l_{CPB} U_2^2}{2\Delta_3 n_{CO}^2} \int_{x=0}^{h} \left( \left( n_{CO} - 1 \right) + \frac{x}{hm} \right)^2 dx \,. \tag{2.124}$$

Эта величина может быть найдена, как энергия, запасенная в конденсаторе *С*<sub>1-3</sub>, образуемой секцией вторичной обмотки и заземленной первичной обмоткой (рис. 2.14) при воздействии максимального напряжения этой секции [33]:

$$W_{1-3} = \frac{C_{1-3}U_2^2}{2}.$$
 (2.125)

Если приравнять левые части уравнений (2.124) и (2.125), а также повторить приведенные выкладки для всех секций высоковольтной обмотки, то получается выражение для определения емкости каждой секции относительно низковольтной обмотки:

$$C_{1-3} = \dots = C_{5-3} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l_{CPB}}{\Delta_3 n_{CO}^2} \int_0^h \left( n_{CO} - 1 + \frac{x}{hm} \right)^2 dx = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l_{CPB} h}{\Delta_3 n_{CO}^2} \left( \left( n_{CO} - 1 \right)^2 + \frac{\left( n_{CO} - 1 \right)}{m} + \frac{1}{3m^2} \right).$$
(2.126)

Другим конструктивным элементом обмотки, где запасается энергия электрического поля, является межслоевая изоляция каждой секции. В этом случае для одной секции с учетом конструкции и электрической схемы обмотки (рис. 2.13, 2.14) выражения (2.121) – (2.123) для одного слоя секции приобретают вид:

$$dC_{CT} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l_{CPB}}{\Delta_{CTT}} dx,$$
  

$$dW_{CT} = \frac{dC_{CT} U_x^2}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l_{CPB} U_x^2}{2\Delta_{CTT}} dx,$$
  

$$U_x = \frac{2xU_2}{hn_{CO}m},$$
  
(2.127)

где  $\Delta_{c,m}$  – толщина изоляции между слоями.

По аналогии с выражением (2.124) может быть найдена энергия электрического поля, сосредоточенного слоевой изоляции с учетом числа межслоевых изоляционных промежутков одной секции, к которой следует приравнять энергию в эквивалентной емкости слоевой изоляции:

$$W_{CJI} = (m-1) \int_{x=0}^{h} dW_{CJI} = \frac{2(m-1)\varepsilon\varepsilon_0 l_{CPB} h U_2^2}{\Delta_{CJIT} n_{CO}^2 m^2} = \frac{C_{CJIT} U_2^2}{2}, \qquad (2.128)$$

откуда нетрудно получить выражение для определения емкости межслоевой изоляции:

$$C_{CII} = \frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_r l_{CPB} \left(m - 1\right)}{3\Delta_{CIII} n_{CO}^2 m^2}.$$
(2.129)

Как показывает анализ формулы (2.128) и (2.129), значение этой емкости оказывается приведенным к величине наибольшего напряжения секции. Рассуждения и выкладки, аналогичные приведенным выше, позволяют сделать вывод, что слоевая емкость каждой из всех остальных секций высоковольтной обмотки будет иметь одинаковую величину, определяемую выражением (2.129).

Благодаря использованию рассмотренного выше порядка определения емкостных параметров было получено выражение для определения величины емкости между соседними секциями:

$$C_{12} = C_{23} = C_{34} = C_{45} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon l_{CPB} b}{\Delta_C} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2, \qquad (2.130)$$

где *b* – ширина секции в сечении (рис. 2.13).

Индуктивные параметры обмоток трансформатора повышенной частоты, обусловленные магнитным полем рассеивания, удобно по аналогии с емкостными параметрами находить через определение энергии этого магнитного поля [33]. Применительно к низковольтной (первичной), простейшей по своей конструкции, однослойной цилиндрической обмотке с учетом параметров рис. 2.13 индуктивность, обусловленная потоками рассеивания, вычисляется по формуле [33]:

$$L_{1S} = \frac{\mu_0 w_1^2 l_{CPB}}{n_{CO} h + \Delta_c \left(n_{CO} - 1\right)} \left(\Delta_3 + \frac{d_1 + d_2}{3}\right),$$
(2.131)

где  $\Delta_3$  – толщина изоляции между низковольтной и высоковольтной обмотками,  $w_1$  – число витков первичной обмотки, h – высота секции в сечении (рис. 2.13),  $d_1$ – диаметр (высота) провода первичной обмотки,  $d_2$  – диаметр (высота) провода вторичной обмотки. Расчет индуктивности рассеивания одной секции высоковольтной (вторичной) обмотки с учетом ее многослойной конструкции (рис. 2.13 и 2.15) производится [33]:

$$L_{CS} = \frac{\mu_0 w_2^2 l_{CPB}}{h} \cdot \left[ \Delta_3 + \frac{1}{m^2} \cdot \sum_{k=1}^{m-1} (\Delta_{CIIT} \cdot (m-k)^2 + \frac{d_1}{3} + \frac{1}{3} \sum_{k=0}^{m-1} d_2 \cdot F(k,m) \right], \quad (2.132)$$

где  $\Delta_3$  – толщина изоляции между низковольтной и высоковольтной обмотками,  $w_2$  – число витков вторичной обмотки, h – высота секции в сечении (рис. 2.15),  $d_1$ – диаметр (высота) провода первичной обмотки,  $d_2$  – диаметр (высота) провода вторичной обмотки, m – число слоев обмотки в одной секции, F(k,m) – функция числа слоев обмотки:

$$F(k,m) = 3\left[ (1 - \frac{k}{m}) \cdot (1 - \frac{k+1}{m}) + \frac{1}{m^2} \right].$$
 (2.133)



Рис. 2.15. Схема расположения слоев первичной и вторичной обмоток трансформатора

## 2.4.3. Определение параметров схемы замещения силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Как свидетельствуют литературные источники [2, 33] и как показано выше (раздел 2.1), при расчетах установившихся процессов в электрических цепях с несинусоидальными токами и напряжениями повышенной частоты силовой трансформатор может быть представлен традиционной Т-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами, представленной на рис. 2.16.



Рис. 2.16. Схема замещения силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты

Учитывая, что первичная обмотка силового трансформатора повышенной частоты выполняется, как правило, однослойной (рис. 2.12 и 2.13) для определения емкости первичной обмотки относительно земли (магнитопровода) можно воспользоваться соотношением, полученным в [33]:

$$C_{TH} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l_{CPB} (h - 2\Delta_2)}{3\Delta_1}, \qquad (2.134)$$

где геометрические параметры (h,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ) определяются согласно рис. 2.12 и рис. 2.13, а  $l_{CPB}$  по формуле (2.91).

Более сложную задачу представляет собой определение в схеме замещения (рис. 2.16) емкости высоковольтной (вторичной) обмотки  $C_{BH}$ . В этом случае, полагая, что первичная обмотка имеет нулевой потенциал, а вторичная (рис. 2.12) состоит из пяти секций ( $n_{CO} = 5$ ), вторичную обмотку следует представить емкостной схемой замещения, показанной на рис. 2.17. Значения емкостей, входящих в эту схему замещения, вычисляются с использованием полученных в разделе 2.4.2 формул (2.126), (2.129) и (2.130).



Рис. 2.17. Емкостная схема замещения высоковольтной (вторичной) обмотки силового трансформатора повышенной частоты

В этом случае емкость высоковольтной обмотки в схеме замещения рис. 2.16 может быть найдена, как эквивалентная емкость в схеме рис. 2.17 относительно высоковольтного зажима  $U_2$ :

$$C_{TB} = \frac{\left( \left( \frac{C_{45} \cdot (C_{CT} + C_{53})}{C_{45} + C_{CT} + C_{53}} + C_{43} + C_{CT} \right) \cdot C_{34}}{C_{45} + C_{CT} + C_{53}} + C_{43} + C_{CT} + C_{34}} + C_{33} + C_{23} + C_{$$

Значение взаимной емкости между высоковольтной и низковольтной обмотками следует определять по формуле:

$$C_{BH} = C_{1-3} + C_{2-3} + C_{3-3} + C_{4-3} + C_{5-3}.$$
(2.136)

Слагаемые правой части формулы (2.136) вычисляются с помощью соотношения (2.126). Следует отметить, что схема замещения рис. 2.17, а также формулы (2.135) и (2.136) справедливы только конструкции трансформатора,

показанной на рис. 2.12, т.е. для числа секций высоковольтной обмотки  $n_{CO} = 5$ . При изменении этого параметра схема рис. 2.17, а также формулы (2.135) и (2.136) должны быть соответственно скорректированы.

Для определения индуктивности рассеяния первичной обмотки можно, без каких-либо изменений, использовать формулу (2.131):

$$L_{SH} = L_{1S} = \frac{\mu_0 w_1^2 l_{CPB}}{n_{CO} h + \Delta_c (n_C - 1)} (\Delta_3 + \frac{d_1 + d_2}{3}).$$
(2.137)

Анализ потоков рассеяния высоковольтной обмотки, состоящей из нескольких секций (рис. 2.12 – рис. 2.14) позволяет сделать вывод, что индуктивность высоковольтной обмотки может быть определена посредством суммирования индуктивностей рассеяния всех секций, значение каждой из которых определяется соотношением (2.132):

$$L_{SB} = n_{CO}L_{CS} = \frac{\mu_0 w_2^2 l_{CPB} n_{CO}}{h} \cdot \left[ \Delta_3 + \frac{1}{m^2} \cdot \sum_{k=1}^{m-1} (\Delta_{CIII} \cdot (m-k)^2 + \frac{d_1}{3} + \frac{1}{3} \sum_{k=0}^{m-1} d_2 \cdot F(k,m) \right]$$
(2.138)

Для определения индуктивности намагничивания можно воспользоваться формулой, предложенной в [33]:

$$L_{\mu} = \frac{\mu \mu_0 W_1^2 S_C k_a}{l_{\mu}},$$
(2.139)

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость магнитного материала магнитопровода, обычно для ферритовых сердечников в расчетах принимается  $\mu$  = 1700–1800;  $k_a \leq 1$ – коэффициент заполнения сечения магнитопровода учитывает, что часть сечения заполнена немагнитным материалом, для ферритовых сердечников рис. 2.12  $k_a$ =1;  $l_{\mu}$  – длина средней силовой линии магнитного поля в магнитопроводе, например для Ш-образного сердечника рис. 2.12:

$$l_{\mu} = 2\left(H + h + l_{W} + \frac{3}{4}l_{0}\right).$$
(2.140)

Значения активных сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_\mu$  в схеме замещения рис. 2.16 определяются с помощью формул (2.12), (2.13).

#### 2.5. Методика оценки показателей энергетической эффективности

## электротехнических комплексов, содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения и высоковольтные кабельные электропередачи

Важнейшая роль в оценке технической и экономической целесообразности новых разработок в сфере электротехники принадлежит, как известно, показателям энергетической эффективности: величина потерь электроэнергии, коэффициент полезного действия (КПД). В настоящее время практически полностью отсутствуют сведения о таких показателях для ЭТКПЧ.

При работе ЭТКПЧ в них выдается мощность от полупроводниковых преобразователей напряжений, а предварительные оценки [123, 133] показали, что для теоретического определения потерь электроэнергии и величины КПД весьма удобно использовать методы частотного анализа (раздел 2.1). В этом случае функция ЭДС U(t), описывающая изменение BO времени источника (преобразователя) напряжения повышенной частоты (рис. 2.2, 2.3), может быть представлена как сумма гармоник с использованием разложения в ряд Фурье согласно (2.1) и (2.4). Затем, как показано в разд. 2.1, после представления электротехнического комплекса (рис. 2.1) эквивалентной схемой исходного замещения (рис. 2.3) поочередно для каждой гармоники выполняется расчет эффективных значений напряжений  $U_{k,j}$  и токов  $I_{k,j}$  в элементах этой схемы (j – номер элемента) существующими методами теории цепей для синусоидальных токов и напряжений. Результаты расчетов позволяют определить активную мощность, потребляемую нагрузкой посредством суммирования мощности всех гармоник [113]:

$$P_{H} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{\infty} P_{k,i} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{\infty} U_{k,i} I_{k,i} \cos \varphi_{k,i}, \qquad (2.141)$$

где M – общее количество потребителей электроэнергии в электрической системе повышенной частоты;  $\varphi_{k,i}$  – угол сдвига по фазе между напряжением и током k-ой гармоники в i-м потребителе мощности;  $P_{k,i}$  – активная мощность k-ой гармоники в i-м потребителе мощности.

В случае, если все потребители мощности представляют собой активную нагрузку, формула (2.141) принимает более простой вид:

$$P_{H} = \sum_{i=1}^{M} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_{k,i}^{2}}{R_{H,i}},$$
(2.142)

где  $R_{H,i}$  – активное сопротивление *i*-ого потребителя мощности.

Мощность потерь электрической энергии в составных элементах ЭТКПЧ (например, в электропередаче или электрической сети) можно определить суммированием мощности потерь, вызванных токами всех гармоник в активных сопротивлениях всех элементов схемы замещения за исключением нагрузки:

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma \mu} + \sum_{j=1}^{L-M} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta P_{k,j} = \Delta P_{\Sigma \mu} + \sum_{j=1}^{L-M} \sum_{k=1}^{\infty} I_{k,j}^2 R_{k,j}, \qquad (2.142)$$

где

$$\Delta P_{k,j} = I_{k,j}^2 R_{k,j}, \qquad (2.143)$$

где  $\Delta P_{k,j}$  – мощность потери энергии, вызванные током *k*-ой гармоники в активном сопротивлении *j*-ого элемента схемы замещения (кроме нагрузки); *L* – общее количество элементов схемы, содержащих активные сопротивления;  $R_{k,j}$  – активное сопротивление *j*-ого элемента схемы при протекании тока *k*-ой гармоники, т.е. при вычислении потерь, вызванных токами разных гармоник, необходимо учитывать изменение активного сопротивления проводников вследствие поверхностного эффекта, например, по методике, изложенной в [110],

$$\Delta P_{\Sigma\mu} = \sum_{n=1}^{N_{TP}} \Delta P_{n\mu} , \qquad (2.144)$$

где  $\Delta P_{\Sigma\mu}$  – суммарная мощность потерь в магнитопроводах силовых трансформаторов, где n – номер силового трансформатора,  $N_{TP}$  – общее количество силовых трансформаторов в составе электропередачи или электрической сети,  $\Delta P_{n\mu}$  – мощность потерь энергии в магнитопроводе n-го трансформатора. Последний параметр согласно [6, 110] можно определить

посредством суммирования мощности потерь, обусловленных всеми гармониками, по формуле:

$$\Delta P_{n\mu} = 1.64 \cdot 10^{-3} m \sum_{k=1}^{\infty} f_k^{1,31} B_k^{2,49} , \qquad (2.145)$$

где m – масса магнитопровода n-го трансформатора;  $B_k$  – индукция магнитного поля в магнитопроводе для k-ой гармоники определяется на основании [21,113], по известной величине амплитуды напряжения этой гармоники  $U_{n,k}$ , обмоточным данным и параметрам магнитопровода силового трансформатора по формуле:

$$B_{k} = \frac{U_{nk}}{2\pi w_{1} S_{C} f_{k}} \,. \tag{2.146}$$

Некоторые особенности имеют место при определении потерь энергии в транзисторном преобразователе напряжения. Обычно преобразователь получает питание от шин постоянного напряжения, получаемого в результате выпрямления переменного трехфазного напряжения промышленной частоты, к которым одновременно подключена электрическая емкость для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и замыкания токов повышенной частоты [1, 2]. В этом случае потери энергии будут обусловлены наличием активного сопротивления транзисторов преобразователя в открытом состоянии, а также при переходе их из закрытого состояния в открытое и наоборот [1, 2]. Важными паспортными параметрами силовых транзисторов являются падение напряжения на переходе эмиттер-коллектор в открытом состоянии  $\Delta U_T$  и величина постоянного тока коллектора  $I_{k0}$ , при которой определяется это падение напряжения. Наличие этих параметров позволяет определить величину сопротивления транзистора В открытом состоянии:

$$R_T = \frac{\Delta U_T}{I_{\kappa 0}} \,. \tag{2.147}$$

Значение  $R_{\tau}$  определяется конструктивным выполнением транзистора, параметрами используемых ЭТОМ полупроводниковых материалов, при свойствами 2], коллекторного И эмиттерного переходов [1, И можно

предположить, что величина этого сопротивления не будет зависеть от частоты протекающего тока. Учитывая, что в каждый момент времени согласно принципа действия мостового преобразователя напряжения [1, 2], обычно применяемого в мощных электроэнергетических и электротехнических установках, последовательно с электропередачей оказываются включены два транзистора, мощность потерь энергии в преобразователе можно определить суммированием мощности потерь, обусловленных всеми гармониками тока  $I_{k,T}$  в транзисторах:

$$\Delta P_{II} = 2\sum_{k=1}^{\infty} I_{k,T}^2 R_T = 2R_T \sum_{k=1}^{\infty} I_{k,T}^2 . \qquad (2.148)$$

Известные значения мощности в нагрузке (2.141) и мощности потерь энергии согласно (2.142) и (2.148) позволяет определять КПД всей электропередачи (или электрической системы), включая полупроводниковые преобразователи напряжения:

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Delta P + \Delta P_{\Pi}} \,. \tag{2.149}$$

Кроме этого, не составляет труда определить отдельно КПД преобразователя напряжения:

$$\eta_{\Pi} = \frac{P_H + \Delta P}{P_H + \Delta P + \Delta P_{\Pi}}, \qquad (2.150)$$

а также КПД электропередачи (электрической системы) без учета преобразователей напряжения:

$$\eta_{\Im\Pi} = \frac{P_H}{P_H + \Delta P} \,. \tag{2.151}$$

#### 2.6. Выводы по главе 2

1. Методика частотного анализа с использованием разложения несинусоидальных токов и напряжений в ряд Фурье является эффективным и удобным инструментом для теоретических исследований процессов в ЭТКПЧ с

нетрадиционными параметрами переменных токов и напряжений, выполненных на основе силовой полупроводниковой преобразовательной техники.

2. При использовании разложения в ряд Фурье несинусоидальных токов и напряжений в процессе расчета электрических цепей с полупроводниковыми преобразователями напряжения необходимо обязательно учитывать: форму осциллограммы ЭДС полупроводникового преобразователя напряжения ЭТКПЧ; влияние частоты гармоник на величину активных сопротивлений обмоток силовых трансформаторов и жил кабельной линии; изменение величины внутреннего сопротивления силовых полупроводниковых элементов (транзисторов) согласно методике, рассмотренной в разделе 2.2.

3. Рабочее напряжение высоковольтных кабельных электропередач в составе ЭТКПЧ допускается выбирать максимально возможным для обеспечения максимальной передаваемой мощности.

4. Если рабочее напряжение высоковольтной кабельной линии повышенной частоты не будет превышать значения, определяемого из соотношения (2.52), срок службы её изоляции окажется не ниже расчётного значения  $\tau = \tau_{CЛ}$  при заданной надежности *P* и длине кабельной линии *l*.

5. Методика численно-аналитического расчета установившегося электротеплового режима высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ является универсальным, удобным, простым инструментом исследования установившихся температурных режимов кабельных линий. Использование методики на практике не требует от пользователя глубокой профессиональной подготовки, что выгодно отличает ее от существующих примеров сложного и громоздкого численного расчета температурных полей методом конечных элементов.

6. Применение энергетического подхода для расчета емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты является удобным способом оценки этих показателей и хорошей альтернативой численному расчету электрического поля изоляционной

конструкции трансформатора в трехмерном пространстве, который требует больших затрат сил и времени, а также специальной подготовки пользователя.

7. Применение энергетического подхода позволило получить сравнительно простые расчетные соотношения для определения емкостных и индуктивных параметров обмоток силовых трансформаторов повышенной частоты в случаях, представляющих практических интерес и не имеющих готовых решений в литературных источниках.

8. В случае использования энергетической методики определения параметров схемы замещения трансформатора необходимо учитывать особенности конструктивного исполнения высоковольтной обмотки силового трансформатора повышенной частоты.

9. При разработке методики расчета основных конструктивных параметров трансформатора (выбор магнитопровода, конструктивного выполнения обмоток) учтено влияние поверхностного эффекта и эффекта близости в отличие от существующих подобных методик расчета. Кроме этого в методику введена процедура вычисления активного сопротивления, отражающего потери в магнитопроводе трансформатора.

10. Рассмотренная методика определения ёмкостных И индуктивных параметров является основой для определения параметров традиционной Ттрансформаторов образной повышенной схемы замещения частоты при выполнении электрического расчета электротехнических комплексов, содержащих полупроводниковые преобразователи и высоковольтные линии электропередачи повышенной частоты.

### Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Вполне очевидно, что широкому применению предложенных в главе 2 теоретических разработок должна предшествовать их тщательная и всесторонняя экспериментальная проверка. Весьма удобным способом решения такой задачи является создание и исследование в лабораторных условиях физических моделей разрабатываемых устройств, которые по своим характеристикам И конструктивному выполнению были бы в максимальной степени приближены к устройствам, предназначенным для использования в реальных производственных условиях. При этом такое исследование целесообразно выполнить вначале применительно к отдельным элементам ЭТКПЧ: силовые трансформаторы и полупроводниковые (транзисторные) преобразователи напряжения, а затем перейти к исследованию комплекса в целом. Эти элементы в основном определяют технико-экономические показатели всего комплекса и полученные в ходе экспериментов их характеристики и показатели позволят не только выполнить проверку теоретических разработок, но сделать выводы о возможности и целесообразности создания и применения локальных ЭТКПЧ на основе полупроводниковых преобразователей напряжения как централизованных систем промышленного электропитания технологических устройств, например, на предприятиях строительной отрасли.

#### 3.1. Исследование характеристик силового оборудования электротехнического комплекса повышенной частоты

Силовые высоковольтные трансформаторы являются обязательным элементом ЭТКПЧ. В установках с несинусоидальными токами и напряжениями повышенной частоты эти устройства имеют ряд специфических особенностей, например, они значительно меньше по весу и размерам трансформаторов промышленной частоты 50 Гц, магнитопровод выполняется, как правило, из феррита [110, 111], практически не применяется бумажно-масляная изоляция. В настоящее время практически отсутствуют технические характеристики, эксплуатационные показатели таких трансформаторов промышленного производства (глава 1, 2). Предложенная методика расчета таких трансформаторов (раздел 2.4) и полученные результаты ее применения требуют экспериментальной проверки.

#### 3.1.1. Методика экспериментальных исследований силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Анализ упомянутых выше способов и методов экспериментального определения параметров трансформаторов (глава 1) позволяет сделать вывод, что для определения потерь в силовых трансформаторах повышенной частоты целесообразно использовать калориметрические методы, адаптированные к измерениям на конкретном объекте (трансформаторе). Как известно, такие методы основаны на прямом измерении достаточно простых физических параметров (масса, время и температура) и обеспечивают высокую точность получения конечного результата.

Предложенный метод подразумевает, что изготовленный двухобмоточный высоковольтный силовой трансформатор на требуемую мощность помещается в теплоизоляционный корпус (например, выполненный из пенопласта, рис. 3.1). На первичную обмотку подается несинусоидальное напряжение с необходимыми параметрами (амплитуда, частота, форма – разд. 2.1), вторичная обмотка либо разомкнута (опыт холостого хода – при определении потерь энергии в магнитопроводе), либо замкнута накоротко (опыт короткого замыкания – при определении потерь энергии в обмотках) (рис. 3.1).


б)



Рис. 3.1. Экспериментальная установка по определению параметров XX и K3 силового трансформатора повышенной частоты мощностью 4 кВА: а – общий вид установки во время опыта: 1 – ЛАТР, 2 – блок измерительной аппаратуры, 3 – преобразователь напряжения, 4 – испытуемый трансформатор; б – силовой трансформатора без теплоизоляции; в – силовой трансформатор с теплоизоляцией в ходе проведения эксперимента

Измеряется температура внутри теплоизоляции (с известным коэффициентом теплопроводности и массогабаритными параметрами) в различные моменты времени. Измерения температуры производятся с помощью термометра, состоящего из блоков типа TC-1088 и ИКСУ-260. Для каждого измеренного значения температуры производится расчет выделяемой энергии, Дж [136]:

$$W = c_{cepd} \cdot m_{cepd} \cdot (T - T_0) + c_{obm} \cdot m_{obm} \cdot (T - T_0) + \Delta W_{H3}, \qquad (3.1)$$

где  $c_{cepd}$ ,  $c_{o\delta M}$  — известные удельные теплоемкости материалов сердечника и обмотки трансформатора, Дж/(кг·К);  $m_{cepd}$ ,  $m_{o\delta M}$  — соответственно массы сердечника и обмотки, кг;  $\Delta W_{H3}$  — потери энергии, Дж, через теплоизоляцию — определяются по методике, рассмотренной в [119,137],  $T_0$  и T — начальная и конечная температура на каждом временном участке (табл. 3.1).

В качестве примера использовании методики в табл. 3.1 приведены результаты эксперимента с силовым трансформатором (рис. 3.1) в режиме XX при воздействии несинусоидального напряжения, имеющего частоту 17,3 кГц, а также вычислений по формуле (3.1). В эксперименте масса сердечника составила 1,2 кг, масса медной обмотки 0,2 кг. Удельная теплоемкость феррита принята равной 900 Дж/(кг·К), меди – 385 Дж/(кг·К). Аналогичные результаты можно получить и при выполнении опыта короткого замыкания (КЗ).

Время, мин	Время, сек	Температура, °С	W, Дж
0	0	23	0,00
10	600	29	6942,00
20	1200	35,5	14462,50
30	1800	42	21983,00
40	2400	49	30082,00
50	3000	56	38181,00

Таблица 3.1 Экспериментальные результаты для опыта ХХ и рабочей частоте в 17,3 кГц

По полученным значениям энергии, выделяемой в трансформаторе, строится зависимость выделяемой энергии от времени, которая в общем виде хорошо описывается линейной зависимостью вида:

$$W = At + B, \qquad (3.2)$$

как показано на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Экспериментальные зависимости выделяемой энергии в трансформаторе от времени для рабочей частоты напряжения при опыте холостого хода: 1 – 17,4 кГц; 2 – 13,3 кГц; 3 – 10,5 кГц

Расчет коэффициентов *A* и *B* целесообразно выполнять при построении зависимостей рис. 3.2 средствами Excel с определением параметров линии тренда. Полученные результаты позволяют определить мощность потерь, BT, холостого хода (XX) (потерь энергии в магнитопроводе) и короткого замыкания (K3)( потерь энергии в обмотках) с использованием соотношения:

$$\Delta P_{XX} \left( \Delta P_{K3} \right) = \frac{dW}{dt} = \frac{d\left(At + B\right)}{dt} = A, \qquad (3.3)$$

т.е. мощность потерь энергии, Вт, численно равна коэффициенту А в формуле (3.2).

Если опыт КЗ был выполнен при значении тока в обмотках отличного от номинального, то можно выполнить пересчет мощности потерь короткого замыкания с измеренного значения на значение, соответствующего номинальному режиму работы с помощью формулы (3.4):

$$\Delta P_{K3} = \Delta P_{K3}^{H3M} \cdot \left(\frac{I_{HOM}}{I_{H3M}}\right)^2, \qquad (3.4)$$

где  $\Delta P_{K3}^{H3M}$  — мощность потерь в обмотках трансформатора в опыте короткого замыкания (3.3),  $I_{H3M}$ ,  $I_{HOM}$  — соответствующе значение тока короткого замыкания в опыте и соответствующее номинальному значению тока K3,  $\Delta P_{K3}$  соответствующая номинальному значению мощность потерь в обмотках при K3. Таким образом, представленный способ определения потерь в сердечнике и обмотках силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты является простым, точным и сочетает в себе преимущества калориметрического метода и метода измерения мощности на сверхвысоких частотах (СВЧ) (см. гл. 1).

### 3.1.2. Результаты исследований характеристик силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Применение более высокой частоты, чем промышленная (50 Гц), позволяет сократить габариты и вес основных элементов современных электрических комплексов и систем – силовых трансформаторов [17, 18, 110, 111]. Однако в настоящее время нет точных сведений о показателях энергетической эффективности силовых трансформаторов повышенной частоты, которые позволили бы сделать

выводы о возможности и целесообразности применения в составе ЭТКПЧ. Поэтому весьма актуальной задачей является оценка этих показателей, поскольку на силовые трансформаторы приходится значительная доля стоимости централизованных высоковольтных систем электропитания технологических установок [110, 111].

Для оценки показателей энергетической эффективности высоковольтных силовых трансформаторов повышенной частоты были использованы расчетная определения, представленная В разделе 2.4 методика ИХ И методика экспериментального определения мощности потерь энергии, описанная в разделе 3.1.1. Важнейшими показателями энергетической эффективности являются мощности потерь холостого хода  $\Delta P_{XX}$ , Вт, и короткого замыкания  $\Delta P_{K3}$ , Вт, а также КПД трансформатора. В ходе исследований предполагалось, что рабочая частота переменного напряжения электротехнического комплекса будет находиться в пределах от 5 кГц до 20 кГц [17, 18, 25-29] и потребуется применение трансформаторов с использованием ферритового магнитопровода. Оценки были выполнены для трех значений номинальной мощности  $P_{HOM}$ силовых трансформаторов – 4, 10, 16 кВА [138]. Эти значения номинальной мощности представляют наибольший интерес для использования в составе ЭТКПЧ в условиях производства. Предполагалось, что для изготовления силовых трансформаторов будут использоваться сердечники фирмы EPCOS, которая отличается широкой номенклатурой изделий, а фирма является одним из мировых лидеров их производства. При этом трансформатор выполняется однофазным двухобмоточным и номинальное напряжение первичной обмотки составляет 500 В. Выбранное напряжение обусловливается максимальным напряжением на выходе полупроводникового преобразователя, работающего от трехфазной сети промышленной частоты 220/380 В. Номинальное напряжение высоковольтной обмотки выбрано равным 3 кВ, что приблизительно соответствует фазному напряжению трехфазной кабельной сети 6 кВ. Форма напряжения на выходе преобразователя близка к прямоугольной. Трансформатор выполняется с сухой изоляцией и без корпуса, что позволяет встраивать его напрямую в устройства ЭТО железобетонных изделий.

В результате теоретических оценок мощности потерь холостого хода ( $\Delta P_{XX}$  – мощность потерь, Вт, в магнитопроводе) и короткого замыкания ( $\Delta P_{K3}$  – мощность потерь, Вт, в меди), а также суммарной мощности потерь, Вт, ( $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3}$ ) с использованием расчетной методики [2, 110, 111] (раздел 2.4.1) были получены зависимости этих показателей от частоты, которые представлены на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Зависимости мощности потерь от рабочей частоты трансформатора. 1, 2, 3 – мощность потерь холостого хода  $\Delta P_{XX}$  и 4, 5, 6 – мощность потерь короткого замыкания  $\Delta P_{K3}$  в трансформаторах мощностью 16, 10, 4 кВА, соответственно.  $\Box$ ,  $\Delta$  – результаты измеренных потерь мощности в опыте XX и K3, соответственно для трансформатора 4 кВА

Как следует из рис. 3.3, по мере увеличения частоты наблюдается довольно существенное уменьшение мощности потерь короткого замыкания (например, при мощности 16 кВт в 3–3.5 раза). Это объясняется тем, что с увеличением частоты снижается число витков и, соответственно, активное сопротивление обмоток трансформатора (табл. 3.2). Увеличение мощности потерь холостого хода вызвано увеличением рабочей частоты (2.111). Разброс расчётных точек (отмечены черным цветом – рис. 3.3) объясняется ограничениями в подборе необходимых сердечников из существующего (представленного на рынке) типоразмерного ряда.

Мощность трансформатора	Частота, кГц	Тип сердечника	Число витков первичной обмотки	Число витков вторичной обмотки
	5		108	530
	8		67	334
	10		54	265
4 кВА	13	EE110	42	206
	15		36	176
	18		31	152
	20		27	132
	5	EE185	94	462
	8	EE128	54	270
	10	EE128	43	211
10 кВА	13	EE110	42	206
	15		36	176
	18		31	152
	20		27	132
	5	EE185	47	230
	8	EE185	58	284
	10	EE185	47	230
16 кВА	13	EE128	34	167
	15		29	143
	18		24	118
	20		22	108

Таблица 3.2 Расчётные показатели трансформаторов повышенной частоты

Результаты расчетов были проверены посредством проведения опыта короткого замыкания и холостого хода на реальном трансформаторе с мощностью 4 кВт (3 сердечника EE65). На рис. 3.3 точками 🗖 и  $\triangle$  представлены опытные значения мощности потерь XX и K3 при частотах 10,5; 13,3; 17,4 кГц. Учитывая заметные отличия в конструкции магнитопровода опытного и расчётного вариантов трансформатора, совпадение результатов расчета и опыта (рис. 3.3) можно оценить, как вполне удовлетворительное.

Полученный характер изменения мощности потерь  $\Delta P_{XX}$  и  $\Delta P_{K3}$  (рис. 3.3) предопределяет форму зависимостей суммарных потерь, которые имеют вид кривых с минимумом (рис. 3.4). Также наблюдается хорошее согласование результатов расчёта и эксперимента.



Рис. 3.4. Зависимость мощности суммарных потерь от частоты в трансформаторах при различных значениях номинальной мощности: 1- 16 кВА, 2 -10 кВА, 3- 4 кВА,  $\Box$  – результаты эксперимента для трансформатора 4 кВА

Анализ сведений рис. 3.3 и рис. 3.4 позволяет сделать вывод о том, что минимум потерь достигается в диапазоне частот 11–13 кГц независимо от номинальной мощности трансформатора. Характерно, что такие значения рабочей частоты соответствуют благоприятным условиям работы мощных полупроводниковых преобразователей напряжения на IGBT транзисторах [17, 18, 139].

С использованием результатов оценки мощности потерь (рис. 3.3, 3.4) были определены значения такого важного параметра, как КПД трансформатора при номинальной мощности (2.114). Полученные зависимости для КПД силовых трансформаторов повышенной частоты представлены на рис. 3.5.

115



Рис. 3.5. Зависимости КПД от частоты рабочего напряжения для трансформаторов непромышленной частоты различной мощности: 1- 16 кВА, 2- 10 кВА, 3- 4 кВА, экспериментальные значения для трансформатора 4 кВА

Представленные зависимости (рис. 3.5) имеют вид кривых с максимумом в диапазоне частот 11–13 кГц, соответствующего области минимума суммарных потерь (рис. 3.4). Вместе с тем, следует отметить, что в исследованном интервале частот 5-20 кГц изменение величины КПД не превышает 1,5% от максимального значения, а сам КПД составляет практически 99,5%. Доля потерь не превышает 0,5% номинальной мощности.

Рассматривая возможность создания и применения трансформаторов повышенной частоты, необходимо сравнить их потери и КПД с аналогичными показателями трансформаторов промышленной частоты. На рис. 3.6 представлены значения КПД существующих трансформаторов промышленной частоты.



Рис. 3.6. Значения КПД трансформаторов промышленной частоты 1 – ОМП 4 кВА/6 кВ; 2 – ОМП 10 кВА/6кВ; 3 – ОМП 20 кВА/6кВ; 4 – ТМЭ 400 кВА/6кВ; 5 – ТДЦ 400 МВА/500 кВ

Для сравнения выбраны трансформаторы, имеющие такую же (или близкую) номинальную мощность, как и трансформаторы повышенной частоты (4, 10 и 20 кВА), так и более высоких мощностей, вплоть до предельных (ТМЭ 400 кВА/6кВ и ТДЦ 400 МВА/500 кВ). Анализ сведений, представленных на рис. 3.5 и 3.6 позволяет сделать вывод, что при одинаковых значениях номинальной мощности трансформаторы повышенной частоты имеют приблизительно на порядок меньшую величину потерь. Как и в случае трансформаторов промышленной частоты, у трансформаторов повышенной частоты наблюдается увеличение КПД с ростом номинальной мощности (рис. 3.5, 3.6). В случае трансформаторов промышленной частоты значение КПД, соответствующее полученным для трансформаторов повышенной частоты (рис. 3.5), достигается лишь при мощности близкой к предельной (ТДЦ 400 МВА/500 кВ – рис. 3.6).

Полученные результаты исследования потерь энергии и измерения КПД силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты говорят о широких перспективах и целесообразности их применения в ЭТКПЧ.

## 3.1.3. Определение емкостных и индуктивных параметров схемы замещения силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

Как показано в главе 2, для достоверного расчета электрических режимов работы ЭТКПЧ (раздел 2.1), кабельных состоящих ИЗ высоковольтных электропередач, силовых трансформаторов и полупроводниковых преобразователей напряжения, требуется точное определение параметров схемы замещения. Решение этой задачи в отношении таких элементов, как линии и полупроводниковые преобразователи, не составляет большого труда. Это можно сделать на основании существующих справочных сведений (раздел 2.1). Значительно более сложную представляет определение параметров схемы замещения задачу силовых трансформаторов повышенной частоты. Теоретические основы решения этой задачи представлены в разделе 2.4.2, а проверку этих теоретических разработок целесообразно выполнить на примере конкретной конструкции такого силового трансформатора.

На рис. 2.12 схематично представлен один из наиболее реальных вариантов конструктивного выполнения силового высоковольтного трансформатора в составе ЭТКПЧ мощностью 3 кВт, номинальное напряжение первичной обмотки  $U_1 = 250$  B,  $U_2 = 1250$  B, рабочая частота f = 13 кГц. Первичная обмотка имеет 26 витков из медного эмалированного провода диаметром 1,5 мм. Вторичная обмотка выполнена медным эмалированным проводом диаметром 0,7 мм, каждая из пяти секций (катушек) имеет по 26 витков (полное число витков вторичной обмотки – 130). Секции вплотную прилегают друг к другу и разделены картонными барьерами толщиной около 0,5 мм. В пределах каждой секции провод наматывается послойно (всего четыре слоя), а укладка провода в каждом последующем слое выполняется во встречном направлении по отношению к предыдущему слою.

Были выполнены экспериментальные измерения емкостей трансформатора (рис. 2.14) с помощью цифрового RLC-метра APPA 703. Предварительно при изготовлении трансформатора для повышения электрической прочности его изоляции производилась пропитка обмоток парафином. Измерения ёмкостей между секциями (*C*<sub>12</sub>, *C*<sub>23</sub>, *C*<sub>34</sub> *u m*.*d*.) и емкостей секций обмоток на землю (*C*<sub>1-3</sub>, *C*<sub>2-3</sub> *u т*.д.) были выполнены до и после пропитки согласно схемам измерений ёмкостей на рис. 3.7.



Рис. 3.7. Схема замещения: а – при измерении емкости между соседними секциями высоковольтной обмотки; б – при измерении емкости одной секции высоковольтной обмотки относительно первичной обмотки

Следует также иметь в виду, что произвести измерения каждого из емкостных параметров, определяемых формулами (2.126, 2.130) полученными в предыдущем разделе, затруднительно. Например, при измерении емкости секции высоковольтной обмотки относительно первичной обмотки ( $C_{1-3}$ ,  $C_{2-3}$  и т.д) и емкости между соседними секциями ( $C_{12}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{34}$  и т.д.) возникает ситуация, которая может быть представлена рис. 3.7 (а, б) соответственно. Результаты измерений приведены табл. 3.3.

Измеренный параметр	Частота f, Гц			
Емкость С, пФ	100	1000	10000	100000
$C_{12}$	21,5/25	19,8/23,4	19,16/22,6	18,68/21,75
C <sub>23</sub>	22,9/28,4	21,2/25,4	21,02/25,3	20,28/24,4
C <sub>34</sub>	21,7/24,5	19,3/22,7	18,65/21,9	18,42/21,4
$C_{45}$	20,6/25,4	18,8/23,1	17,64/22,35	17,44/21,78
C <sub>13</sub>	15,7/18,1	14,1/17,1	13,56/16,3	13,31/16,25
C <sub>53</sub>	15,4/19	13,8/17,4	13,27/16,7	12,94/16,25
C <sub>24</sub>	18,6/21,9	16,5/20	15,83/19,1	15,87/18,68
$C_{14}$	15,5/18,3	13,9/16,5	13,47/15,68	13,1/15,4
C <sub>25</sub>	14,3/18,6	13,1/16,7	12,59/16,03	12,69/15,1
C <sub>1-3</sub>	24,3/32,1	22,2/28,8	21,58/27,7	21,13/27,3
C <sub>2-3</sub>	28,5/38,4	26,5/33,8	25,57/33,6	25,01/32,6
C <sub>3-3</sub>	24,5/32,4	22,7/27,3	22,06/27,6	21,64/26,8
C <sub>4-3</sub>	25,7/34	23,7/30,5	22,93/29,7	22,5/28,7
C <sub>5-3</sub>	20,9/25,5	19,1/25,3	18,44/24,6	18,15/23,2
$C_{\Sigma-3}$	64,8/90,6	59,7/82,1	57,68/78,31	56,66/76,69

Таблица 3.3. Емкость обмоток силового трансформатора повышенной частоты до/после пропитки

Результаты, приведенные в табл. 3.3, качественно согласуются между собой: действительно, после пропитки емкостные параметры увеличились на 15-20%, что обусловлено замещением воздушных включений диэлектриком (парафином) с более высокой относительной диэлектрической проницаемостью (є). Следует отметить заметное влияние частоты на величину емкостей как до пропитки, так и свидетельствует наличии релаксационной поляризации после, что 0 В изоляционном материале. Увеличение частоты, как известно, приводит к постепенному ослаблению поляризации такого вида, что вызывает уменьшение относительной диэлектрической проницаемости до некоторого установившегося значения и соответствующего изменения электрической емкости.

Сведения для построения расчетной зависимости (рис. 3.8) были получены с использованием формулы (2.126) и сведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Рассчитанная емкость секций вторичной обмотки на землю

Расчетный параметр	Емко	ость С,
Емкость С, пФ	πΦ	в о.е.
C <sub>1-3</sub>	41,400	0,720
C <sub>2-3</sub>	54,660	0,951
C <sub>3-3</sub>	57,500	1,000

Экспериментальные значения емкости катушек вторичной обмотки трансформатора ( $C_{i-3}$ ) относительно земли после пропитки в относительных единицах ( $C_{i-3}/C_{3-3}$ ) при различной величине частоты напряжения при измерениях также представлены на рис. 3.8.



Рис. 3.8. Сравнение результатов расчета и эксперимента по определении емкостных параметров силового трансформатора.  $C_{1-3}=C_{5-3}$ ,  $C_{2-3}=C_{4-3}$ ,  $C_{3-3}$ , – емкость обмотки соответствующей секции относительно земли. Ось абсцисс: 1(5), 2(4) 3 – номер секции высоковольтной обмотки силового трансформатора. Легенда – значения частоты при измерениях емкости, точки – эксперимент (результаты измерения при соответствующей частоте), линия – расчет

Учитывая влияние на результаты измерения индуктивности (которое трудно учесть), рис. 3.8 показывает удовлетворительное согласование результатов расчета и эксперимента.

Экспериментальные измерения индуктивных параметров обмотки силового трансформатора повышенной частоты производились по схеме рис. 3.9 с применением RLC-метра APPA 703.



Рис. 3.9. Схема замещения при измерении индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки

Расчет индуктивных параметров обмотки силового трансформатора повышенной частоты проводился с использованием формул (2.137) – (2.138) для низковольтной и высоковольтной обмотки соответственно.

Результаты измерения индуктивных параметров обмотки силового трансформатора повышенной частоты (рис. 3.9) свидетельствуют, как и следовало ожидать, об отсутствии заметного влияния пропитки на величину этих параметров (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Индуктивность обмотки силового трансформатора повышенной частоты до/ после пропитки

Измеренный параметр	Частота f, Гц		
Индуктивность L, мкГн	1000	10000	100000
L <sub>2-K3</sub> *	331,5/328	281,5/279	241,8/239
$L_{1 K3}^{*}$	22,5/22,5	22,1/22,04	21,35/21,32

\*КЗ – при измерении индуктивности одной из обмоток, вторая обмотка закорачивается.

Результаты экспериментальных и расчетных значений индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки трансформатора повышенной частоты представлены на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Экспериментально измеренные и расчетные значения индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки. Пунктир – расчетное значение индуктивности рассеивания, сплошная линия – экспериментальные данные

Как следует из рис. 3.10, результаты расчета индуктивности рассеивания по формуле (2.138) полностью согласуются с экспериментальными значениями лишь при частоте в 1000 Гц. При увеличении частоты питающего напряжения происходит заметное снижение индуктивности рассеивания обмотки трансформатора, что можно объяснить усилением влияния емкостных параметров высоковольтной обмотки в соответствии со схемой замещения рис. 3.9, трудно поддающемуся учету в расчетах.

### 3.2. Программная реализация методик расчета установившихся режимов электротехнического комплекса

Для реализации предложенной методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ (раздел 2.1) с применением частотного анализа были разработаны алгоритм и расчетная программа в среде Matlab (Приложение Б).

ЭТКПЧ, Объектом моделирования является состоящий ИЗ полупроводникового преобразователя напряжения, силовых высоковольтных повышенной высоковольтной кабельной трансформаторов частоты, (рис. 2.1, раздел 2.1.). электропередачи, нагрузки При вычислениях с использованием разработанной программы (Приложение Б) осуществляется расчет амплитуды гармоник разложения Фурье для заданного варианта осциллограммы ЭДС (рис. 2.3) и пошаговое увеличение значения времени, начиная от нуля. В каждый момент времени производится расчет токов и напряжений схемы замещения (рис. 2.4) электротехнического комплекса (рис. 2.1) в комплексной форме для всех гармоник разложения (разд. 2.1) с использованием традиционной представленной табл. 3.6. В этом случае процедуры, В осуществляется последовательное преобразование исходной схемы (рис. 2.4) к простейшему виду и наоборот, что упрощает программирование, ускоряет вычисления, делает более удобным пошаговый анализ протекающих процессов, а также обеспечивает наглядность расчета в случае использования методики в учебном процессе.

Τa	аблица	3.6	Последовательности	расчетов
----	--------	-----	--------------------	----------

Схема замещения	Расчетные формулы
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Сворачиваем схему в направлении от нагрузки к источнику: $Z_{1} = \frac{-jX_{CTHk} \cdot Z_{H}}{-jX_{CTHk} + Z_{H}}$
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$Z_{2} = Z_{1} + j \frac{X_{SHk}}{2} + \frac{R_{1}}{2}$ $Z_{3} = \frac{jX_{\mu} \cdot R_{\mu}}{jX_{\mu} + R_{\mu}}$ $Z_{4} = \frac{Z_{3} \cdot Z_{2}}{Z_{3} + Z_{2}}$
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$Z_{5} = Z_{4} + j \frac{X_{SBk}}{2 \cdot k_{m}^{2}} + \frac{R_{2}}{2}$



Токи и напряжения в различных точках схемы замещения рассчитываются согласно табл. 3.7 с учетом выполненных преобразований этой схемы (табл. 3.6).

Таблица 3.7 Расчет токов и напряжений

Схема замещения	Расчетные формулы
$I_{I}$ $I_{I}$ $Z_{I3}$	$I_1 = \frac{E}{Z_{13}}$





Блок-схема программы электрического расчета установившихся режимов ЭТКПЧ с использованием частотного анализа показана на рис. 3.11, полный текст программы приведен в Приложении Б.



Рис. 3.11. Блок-схема программы электрического расчета ЭТКПЧ на основе частотного анализа

Исходными сведениями расчетов и моделирования в этой программе при расчете установившегося режима являются:

•амплитуда ЭДС полупроводникового преобразователя;

•форма осциллограммы ЭДС (прямоугольной формы, трапецеидальной формы, трапецеидальной формы с паузой, раздел 2.1);

•заданные параметры силовых высоковольтных трансформаторов (разделы 2.4.1, 2.4.2, Приложение А);

•число гармоник для разложения Фурье  $N_K$ ;

•параметры кабельной линии и высоковольтных трансформаторов;

127

•параметры сопротивления нагрузки.

Результатом работы программы являются, прежде всего, расчетные осциллограммы ЭДС полупроводникового преобразователя  $U_{ax}$ , напряжений в начале кабельной линии  $U_1$ , в конце кабельной линии  $U_2$ , напряжения на нагрузке  $U_H$  с учетом характера изменения во времени ЭДС источника (рис. 2.3), как показано на рис. 3.12, а–в. Анализ расчетной программы (Приложение Б) показывает, что посредством ее несложной и однотипной корректировки можно запрограммировать построение расчетной осциллограммы практически любого напряжения или тока схемы замещения (рис. 2.4). Кроме осциллограмм, определяются численные значения различных показателей, например, мощности, выделяемой в нагрузке, мощности потерь электроэнергии и ее составляющие, КПД установки, амплитуда гармоник разложения Фурье кривой ЭДС, мощность каждой гармоники, выделяемой в нагрузке и др.





Рис. 3.12. Характерные расчетные осциллограммы напряжений ЭТКПЧ для мощности нагрузки в 1 кВт: 1 – ЭДС полупроводникового преобразователя, 2 – напряжение на начале кабельной линии, 3 – напряжение в конце кабельной линии, 4 – напряжение на нагрузке; а – при воздействии прямоугольной формы исходного напряжения, б – при воздействии трапецеидальной формы исходного напряжения, в – при воздействии напряжения трапецеидальной формы с паузой

128

Как видно из рис. 3.12, в осциллограммах напряжения, полученных для различных точек исследуемой схемы (рис. 2.4), присутствуют высокочастотные составляющие. Появление этих колебаний можно объяснить возникновением резонанса в цепях схемы замещения (рис. 2.4), обусловленного наличием в ней индуктивных и емкостных элементов и высокой добротностью образующихся колебательных контуров, и наличием отраженных волн в кабеле.

Одним ИЗ наиболее важных аспектов практического использования разработанной программы (рис. 3.11) является выбор обоснованного значения числа гармоник N<sub>K</sub> разложения кривой ЭДС в ряд Фурье. Предварительные расчеты показали, что при числе гармоник N<sub>k</sub>=50 погрешность вычислений мощности в нагрузке P<sub>N</sub> при любой форме осциллограммы ЭДС (рис. 2.3) не превышает 0,0005%, чего вполне достаточно для решения исследовательских задач. Такое значение N<sub>k</sub> было принято в расчетах для варианта осциллограммы ЭДС, представленного на рис. 2.3, в (трапецеидальная форма с паузой). Сравнительно небольшое количество гармоник, участвующих В расчете, объясняется также большими затратами времени на выполнение расчетов по программе, обусловленного многократным численным определением значений интегралов по формулам (2.7). При выполнении расчетов для осциллограмм ЭДС, показанных рис. 2.3, а и 2.3, б, рис. 3.12, а и 3.12, б производительность программы оказалась многократно выше и число гармоник, участвующих в разложении кривой ЭДС было принято равным N<sub>K</sub>=3000. Это необходимо для эффекта Гиббса [113], прослеживается небольших устранения В виде кратковременных всплесков в расчетной кривой ЭДС в момент изменения полярности напряжения.

Важнейшей особенностью предложенной методики электрического расчета электротехнического комплекса повышенной частоты (рис. 2.1) с использованием его схемы замещения (рис. 2.4) на основе частотного анализа (раздел 2.1) является учет влияния частоты воздействующего напряжения (частоты *k*-ой гармоники) согласно формулам (2.11) – (2.12) и (2.21) на активное сопротивление обмоток трансформатора, жилы кабельной линии, а также внутреннего сопротивления преобразователя напряжения. На рис. 3.13 представлены расчетные и

129

экспериментальные осциллограммы высокого напряжения U<sub>2</sub> в конце кабельной линии.



Рис. 3.13. Расчётные (а–г) и экспериментальные (д–е) осциллограммы напряжения в конце кабельной линии ( $l_k = 27$  м) в режиме работы под нагрузкой (1 кВт) (а, в, д) и в режиме холостого хода (б, г, е) при частоте f=17 кГц; в, г – расчетные осциллограммы с учетом влияния частоты на величину активных сопротивлений и внутреннего сопротивления преобразователя; а, б – расчет без учета влияния частоты

Расчетные осциллограммы, полученные с учетом влияния частоты на величину сопротивлений (рис. 3.13, б и 3.13, г) показывают хорошее согласование с результатами эксперимента (рис. 3.13, е и 3.13, д) соответственно. Расчётные

зависимости (рис. 3.13, а и 3.13, б), полученные в предположении неизменной величины активных сопротивлений схемы замещения (рис. 2.4), соответствующей низкой частоте, демонстрируют существенное расхождение с результатами эксперимента (рис. 3.13, е и 3.13, д). Это свидетельствует о необходимости обязательного учета в ходе применения метода частотного анализа зависимость указанных выше сопротивлений от частоты в соответствии с соотношениями (2.11) – (2.12) и (2.21).

Разработанная программа (рис. 3.11, Приложение Б) позволяет выполнять расчеты ЭТКПЧ как в случае применения П-образной схемы замещения высоковольтной кабельной линии (раздел 2.1, рис. 2.4, а), так в случае представления линии в виде элемента с распределенными параметрами (рис. 2.4, б).

Наряду с разработкой программы электрического расчета (рис. 3.11) осуществлена программно-алгоритмическая реализация методики численноаналитического электротеплового расчета высоковольтных кабельных линий, входящих в состав ЭТКПЧ (раздел 2.3). Блок-схема программы представлена на рис. 3.14, а ее текст приведен в Приложении В.

Исходными сведениями расчета по этой программе являются:

• максимальное значение температуры в изоляции кабеля и температура окружающей среды;

• геометрические параметры высоковольтной кабельной линии (раздел 2.3);

• теплофизические и диэлектрические показатели материла изоляции и сведения о зависимости их величины от различных факторов: частоты напряжения, величины напряженности поля, температуры и др.;

• амплитуда рабочего высокого напряжения (на жиле кабеля относительно заземленной оплетки), его частота;

• число слоев *m*, на которые разбивается объем изоляции в поперечном сечении при выполнении численно-аналитического электротеплового расчета высоковольтного кабеля в стационарном режиме (раздел 2.3, рис. 2.12).

Программа составлена из условия, что осциллограмма воздействующего на изоляцию высокого напряжения описывается кривой, представленной на рис. 2.3, в («трапеция с паузой»).

Алгоритм программы по вычислению предельного передаваемого тока по кабелю с применением рассмотренной методики представлен на рис. 3.14.



Рис. 3.14. Блок-схема численно-аналитического расчета температурных характеристик и предельно допустимого значения тока высоковольтного кабеля электропередачи повышенной частоты

Результатом расчетов являются значение плотности теплового потока на поверхности жилы кабеля  $q_{\mathcal{K}f}$ , которое определяется на последнем шаге вычислений по формуле (2.77) при i=1, а также два массива значений размерностью m+2, состоящих из массива средних значений температуры (2.79) в слое  $\overline{T}_i$  и соответствующего ему массива радиусов (2.78) размерностью m. Два остальных члена каждого массива – температура и ее координата на поверхности жилы ( $T_{0,1} = T_{\mathcal{K}}; r_0$ ), а также температура и ее координата на поверхности кабеля  $(T_{s,m}; R)$ . Эти массивы, кроме сведений о точных значениях температуры в различных точках изоляции кабеля, позволяют графически представить

изменение температуры в поперечном сечении кабеля РК-75 (рис. 3.15) в установившемся режиме работы.



Рис. 3.15. Изменение температуры в поперечном сечении кабеля РК-75 в установившемся режиме работы при выполнении расчета в Matlab: напряжение кабеля 10 кВ, частота 13 кГц, наружный диметр кабеля 4,5 мм, диаметр жилы 1 мм, температура окружающего воздуха 35 °C, предельная температура изоляции 70 °C, число слоев m = 100

При выполнении этой программы определяется также температура на поверхности кабеля и предельно допустимая величина тока в жиле кабеля, соответствующие заданным условиям. Кроме этого, для сравнения вычисляется предельно допустимая величина тока в жиле кабеля при использовании переменного рабочего напряжения промышленной частоты 50 Гц, имеющего такую же величину, как и напряжение повышенной частоты.

### 3.3. Исследование установившихся режимов работы электротехнического комплекса повышенной частоты

Как отмечено выше, в целях проверки достоверности разработанной методики (глава 2) электрического расчета ЭТКПЧ в установившемся режиме требуется выполнение экспериментальных и теоретических исследований на примере реального объекта. В дополнение к теоретическим разработкам и их программноалгоритмической реализации, описанным выше (разделы 2.1 и 3.2), необходимо разработать физическую модель такого электротехнического комплекса и методику экспериментальных исследований с использованием этой модели. Кроме проверки теоретических разработок, создание и всестороннее исследование подобной модели позволит оценить возможность и целесообразность применения локальных ЭТКПЧ как централизованных систем электропитания в производственных условиях.

#### 3.3.1. Методика проведения экспериментальных исследований электротехнического комплекса повышенной частоты

Для выполнения экспериментальных исследований были разработаны, изготовлены и испытаны несколько вариантов конструктивного исполнения лабораторной модели ЭТКПЧ. В зависимости от задач экспериментального исследования, электротехнический комплекс в себя: может включать высоковольтную кабельную электропередачу, полупроводниковый преобразователь напряжения, высоковольтные трансформаторы силовые повышенной частоты и нагрузку.

Экспериментальная модель ЭТКПЧ для снятия рабочих характеристик высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты представлена на рис. 3.16.



Рис. 3.16. Электрическая схема лабораторной модели ЭТКПЧ для определения рабочих характеристик электропередачи. 1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 2 – блок контрольно-измерительной аппаратуры (КИП); 3 – полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – нагрузка: в виде ламп накаливания или электротепловых нагревателей; 6, 7 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы; 8 – высоковольтная кабельная линия; ЭО – электронный осциллограф

ЭТКПЧ содержит полупроводниковый преобразователь напряжения 4 (ПП), выполненный на силовых полевых транзисторах (VT1-VT4) типа FQA11N90C, либо на IGBT транзисторах IRG4PSH71UDPBF, номинальной мощностью 1–5 кВт с регулируемой частотой выходного напряжения f = 10-20кГц. На выходе полупроводникового преобразователя (ПП) включен силовой высоковольтный повышающий трансформатор повышенной частоты 7, изготовленный с использованием ферритовых сердечников 2хЕЕ65 (EPCOS), номинальной мощностью 2-3 кВА. С высоковольтной обмотки трансформатора напряжение подается в кабельную линию 8 длиной  $\ell = 12-39$  метров (КЛ) выполненную с использованием кабеля типа РК-50 или РК-75. В конце кабельной линии установлен высоковольтный силовой понижающий трансформатор 6 такой же конструкции и мощности, как и 7, а также установлен делитель (1:10) напряжения (ДН) для измерения и осциллографирования формы рабочего напряжения в конце кабельной линии. К низковольтной обмотке понижающего трансформатора подключена нагрузка 5 в виде ламп накаливания в количестве 11 единиц с мощностью 95Вт каждая и энергосберегающая лампа мощностью 25 Вт. Кроме быть представлена накаливания нагрузка может электронагревательными приборами различной мощности (1–3 кВт).

Внешний вид лабораторной модели ЭТКПЧ представлен на рис. 3.17. Изменением количества одновременно включенных ламп, а также подключением дополнительной нагрузки можно изменять мощность, передаваемую ПО электропередаче, в широких пределах (10÷100%). Такая модель представляет собой фрагмент производственной линии в составе ЭТКПЧ для подачи конкретному производственному потребителю, например, электроэнергии электротехнологической установке по ЭТО бетона. Предварительные оценки длина таких ответвлений в пределах промышленного показывают, что производства будет колебаться в пределах 20-50 м.



Рис. 3.17. Лабораторная модель ЭТКПЧ: 1 – ЛАТР, 2 – КИП – комплект измерительных приборов, 3 – преобразователь напряжения с повышающим трансформатором, 4 – кабель РК-50 12 метров, 5 – понижающий трансформатор, 6, 7 – нагрузка, 8 – делитель напряжения, 9 – осциллограф

Особенностью ЭТКПЧ экспериментальных исследований на С несинусоидальными токами и напряжениями является наличие трудностей при электрических параметров. Причем, если измерение измерении токов и напряжений можно выполнить посредством их осциллографирования, хотя с не очень высокой точностью, то многократно сложней выполнить измерение мощности. В настоящее время практически отсутствуют аппаратные средства измерения активной мощности с достаточно высокой точностью в цепях энергетических установок при несинусоидальных токах и напряжениях, которые позволили бы выполнить необходимые эксперименты. Как показал анализ различных вариантов решения этой проблемы, в том числе методики определения потерь энергии в силовых трансформаторах повышенной частоты (раздел 2.4.1), а также предварительные эксперименты, для опытного определения показателей энергетической эффективности ЭТКПЧ наиболее целесообразным является

136

применение неэлектрического (калориметрического) метода измерения энергии, переданной в нагрузку [140].

Установка, представленная на рис. 3.16, из-за наличия в ее составе ЛАТР и КИП имеет ограничение по мощности величиной в 1 кВт. Поэтому для выполнения экспериментов при больших значениях предаваемой мощности, что необходимо для определения показателей энергетической эффективности, была использована опытная установка, электрическая схема которой представлена на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Электрическая схема установки для определения КПД отдельно транзисторного преобразователя (а) и ЭТКПЧ, состоящего из транзисторного преобразователя и высоковольтной кабельной электропередачи (б): 1 – питающая сеть; 2 – разъем; 3 – управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – нагрузка: три электронагревателя мощностью ~1 кВт (220 В) каждый, установленные в заполненной водой емкости с теплоизоляцией на поверхности; 6, 7 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы; 8 – высоковольтная кабельная линия; *t*° – термометр, состоящий из блоков типа TC-1088 и ИКСУ-260

При включении установки в первом случае (рис. 3.18, а) осуществляется передача мощности от питающей сети промышленной частоты 50 Гц 220 В через управляемый выпрямитель 3, транзисторный преобразователь напряжения 4 сразу в нагрузку 5 – при измерении потерь энергии и КПД самого преобразователя. Во втором случае (рис. 3.18, б) мощность с выхода преобразователя 4 передается в нагрузку 5 еще через силовые трансформаторы 6, 7 и кабельную линию 8 (высоковольтную электропередачу) – при определении потерь и КПД всего комплекса, содержащего преобразователь напряжения и электропередачу. Номинальная мощность силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты 6, 7 (рис. 3.18, б) составляла ~3 кВА, номинальное напряжение низковольтной/высоковольтной 0,25/1,25 обмотки кВ. В \_ качестве высоковольтной кабельной линии 8 (рис. 3.17, б) использовались кабели типа РК-50 и РК-75 длиной  $l_{K} = 12-50$  м. Частота выходного напряжения транзисторного преобразователя f в опытах изменялась в пределах от 8 кГц до 17 кГц. Следует отметить, что в реальных условиях применения установок повышенной частоты, выпрямитель 3 (рис. 3.18) имеет другую конструкцию – трехфазный выпрямитель или полупроводниковый преобразователь большой мощности [17, 18]. Поэтому интерес представляет определение показателей энергетической эффективности преобразователя напряжения 4 и электропередачи (элементы 6, 7, 8).

Для оценки установившихся режимов работы ЭТКПЧ в режиме холостого хода на конце линии и в режиме короткого замыкания была предложена экспериментальная схема на рис. 3.19.



Рис. 3.19. Электрическая схема установки проведения опытов холостого хода и короткого замыкания ЭТКПЧ: 1 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 2 – блок контрольноизмерительной аппаратуры (КИП); 3 – полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – шунт для снятия осциллограмм напряжения и тока; 6, 7 – повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы соответственно; 8 – высоковольтная кабельная линия; 9 – цифровой осциллограф

В опыте холостого хода питание установки производилось от сети промышленной частоты 50 Гц 220 В через ЛАТР, КИП, транзисторный преобразователь напряжения 4 через силовые трансформаторы 6, 7 и кабельную линию 8 (высоковольтную электропередачу). Посредством применения различной комбинации ключей  $S_1$ - $S_3$  были проведены опыты для различных вариантов режима холостого хода.

При исследовании установившихся режимов короткого замыкания в схеме на рис. 3.19 ключи  $S_1$ - $S_3$  были замкнуты, а качестве шунта были использованы две различные конструкции этого элемента — сопротивление промышленного изготовления и сопротивление в виде нихромовой проволоки с бифилярной намоткой (раздел 3.3.2).

# 3.3.2. Результаты исследования работы электротехнического комплекса повышенной частоты в нормальных режимах

Одними из основных характеристик электропередачи являются зависимости напряжения в конце линии  $U_2$  и в начале  $U_1$  от величины передаваемой мощности  $P_C$  при неизменном значении напряжения на входе электропередачи  $U_{BX}$  (рис. 3.16). Полученные в ходе опытов зависимости представлены на рис.3.20, где напряжения в начале линии электропередачи –  $(U_1, \Box)$  и в ее конце –  $(U_2, \Delta)$ .



Рис. 3.20. Зависимости напряжения в начале и в конце линии высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты при частоте рабочего напряжения f = 17200 Гц от величины передаваемой мощности. U<sub>1</sub>,  $\Box$  – напряжение в начале линии электропередачи, U<sub>2</sub>,  $\Delta$  – напряжение в конце линии электропередачи;  $\ell_K = 12$  м

Результаты опыта (рис. 3.16) качественно соответствуют теории электропередач переменного тока промышленной частоты [117]: по мере увеличения передаваемой мощности имеет место постепенное снижение напряжения в различных точках линии.

На рис. 3.21 представлена характерная осциллограмма напряжения в конце кабельной линии  $U_2$ , полученная в ходе экспериментов по схеме, представленной на рис. 3.16 с использованием в конструкции преобразователя напряжения полевых транзисторов (типа FQA11N90C), при величине передаваемой мощности 1 кВт, длине кабельной линии  $l_k = 12$  метров, выполненной кабелем РК-50.



Рис. 3.21. Расчётные (а), (б), (в) и экспериментальная (г) осциллограммы напряжения ЭТКПЧ  $f = 17 \text{ к}\Gamma$ ц при работе под нагрузкой (1 кВт) в конце кабельной линии  $U_2$ , протяженностью  $l_k = 12$  м. а – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 2.7, а («прямоугольная» форма), б – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 2.7, б («трапецеидальная» форма, в – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 2.7, в («трапецеидальная с паузой» форма), г – экспериментальная осциллограмма напряжения

Результат эксперимента, представленный на рис. 3.21, г, позволяет сделать вывод, что даже при достаточно высокой частоте (f = 17,2 кГц) осциллограмма рабочего напряжения кабельной линии имеет форму близкую к трапецеидальной, возможность и целесообразность использования которой обосновывается в [17, 18]. Характерно, что для получения напряжения такой формы не требуется применения каких-либо специальных мер, она формируется естественным образом. Обработка полученных осциллограмм (рис. 3.21) позволила установить полученную в опытах относительную длительности амплитудного значения  $t^* = 2 \cdot t/T \approx 0.85$ , где t - длительность амплитудного значения, T - период колебания. Это означает, что мощность, передаваемая по электропередаче, оказывается приблизительно на 70% выше мощности при синусоидальной форме рабочего напряжения с одинаковой амплитудой [17]. Полученные осциллограммы

141

(рис. 3.21) показывают также, что на фронте каждого полупериода наблюдаются высокочастотные колебания с частотой 250÷300 кГц. Амплитуда этих колебаний составляет около 100 В, что соответствует почти 10% от амплитудного значения напряжения. Сравнение расчетных осциллограмм с осциллограммой, полученной в эксперименте, (рис. 3.21) позволяет сделать вывод о существенном влиянии на результаты расчета выбор вида осциллограммы ЭДС (рис. 2.3). Наилучшее наблюдается соответствие результатов расчета И эксперимента при использовании в вычислениях осциллограмм вида рис. 2.3, б и 2.3, в («трапеция» и «трапеция» с паузой). При использовании в расчетах осциллограммы ЭДС вида форма») рис. 2.3, а («прямоугольная значительно (почти на порядок) высокочастотной составляющей, увеличивается амплитуда т.е. возникает существенная погрешность в вычислениях.

Сравнение результатов расчета КПД ЭТКПЧ при использовании различных вариантов осциллограммы ЭДС источника (рис. 2.3) и экспериментальных результатов согласно схеме (рис. 3.18, б) приведено на рис. 3.22.



Рис. 3.22. Диаграмма значений КПД ЭТКПЧ (РК-75  $l_k=30$  м) при исследовании формы ЭДС источника работе под нагрузкой (~2 кВт) и частоте рабочего напряжения ~13 кГц

Расчетные значения активной мощности, поступающей в комплекс, при использовании различных вариантов осциллограммы ЭДС (рис. 2.3) и значения этого параметра, полученные в экспериментах согласно (рис. 3.18, б) представлены на рис. 3.23.



Рис. 3.23. Диаграмма значений передаваемой мощности ЭТКПЧ (РК-75  $l_k = 30$  м) при работе под нагрузкой (1-3 кВт), т.е. при различном количестве подключенных потребителей электроэнергии (нагревателей – рис. 3.18) и частоте рабочего напряжения ~13 кГц

Результаты, отраженные на рис. 3.22 и 3.23, позволяют сделать вывод о существенном влиянии на результаты расчета выбор вида осциллограммы ЭДС (рис. 2.3). Наилучшее соответствие результатов расчета и эксперимента по величине передаваемой мощности (это важнейший эксплуатационный параметр) наблюдается при использовании в вычислениях осциллограммы вида рис. 2.3, в («трапеция с паузой»). При использовании в расчетах осциллограммы ЭДС вида рис. 2.3, а и рис. 2.3, б («прямоугольная» форма и «трапеция») возникает существенная погрешность в результатах вычисления передаваемой мощности и потерь мощности электротехнического комплекса по абсолютной величине. Однако выбор вида осциллограммы ЭДС практически не сказывается на результатах вычисления КПД установки, которые неплохо согласуются с результатами эксперимента (рис. 4.22). Таким образом, следует сделать вывод, что наилучшие результаты при выполнении электрического расчета установившихся режимов ЭТКПЧ достигаются В случае использования В вычислениях осциллограммы ЭДС, показанной на рис. 2.3, в. Поэтому в дальнейших исследованиях использовался только этот вариант осциллограммы ЭДС.

Для всесторонней проверки предложенной методики электрического расчета (раздел 2.1) целесообразно выполнить сравнение результатов расчета и эксперимента в различных условиях. На рис. 3.24 представлено сравнение расчетных и экспериментальных осциллограмм при  $\ell_K = 12$  м, мощности нагрузки 1 кВт, использовании в конструкции преобразователя напряжения IGBT транзисторов и частоте рабочего напряжения f = ~14 кГц.



#### в) нагрузка

Рис. 3.24. Расчётные (слева) и экспериментальные (справа) осциллограммы напряжений в кабельной линии РК-50  $l_k=12$  м при работе под нагрузкой (~1 кВт) в начале линии (а), конце линии (б) и на нагрузке (в) при частоте рабочего напряжения ~14 кГц
Сравнение расчетных и экспериментальных осциллограмм напряжений ЭТКПЧ при увеличении длины кабельной линии 8 в схеме на рис. 3.16 и 3.17 с  $\ell_K$  =12 м до  $\ell_K$  = 27 м показано на рис. 3.25. Мощность нагрузки, как и в результатах опыта на рис. 3.24, составляла 1 кВт. Частота рабочего напряжения *f*=13 – 14 кГц.



в) нагрузка

Рис. 3.25. Расчётные (слева) и экспериментальные (справа) осциллограммы напряжений в кабельной линии РК-50 *l<sub>k</sub>*=27 м при работе под нагрузкой (~1 кВт) в начале линии (а), конце линии (б) и на нагрузке (в) при рабочей частоте 13 – 14 кГц

Расчётные и экспериментальные осциллограммы напряжений ЭТКПЧ при увеличении нагрузки до 2-3 кВт представлены на рис. 3.26 и 3.27.



Рис. 3.26. Расчётные (слева) и экспериментальные (справа) осциллограммы напряжений в кабельной линии РК-75  $l_k$ =30 м при работе под нагрузкой (~2 кВт) в начале линии (а), конце линии (б) и на нагрузке (в) при рабочей частоте ~13 кГц

147



в) нагрузка

Рис. 3.27. Расчётные (слева) и экспериментальные (справа) осциллограммы напряжений в кабельной линии РК-75 *l*<sub>k</sub>=30 при работе под нагрузкой (~3 кВт) в начале линии (а), конце линии (б) и на нагрузке (в) при рабочей частоте 13–14 кГц

При выполнении расчетной программы (рис. 3.11, раздел 3.2) одновременно с получением расчетных осциллограмм, представленных на рис. 3.21, 3.24–3.27, производится также построение расчетной осциллограммы ЭДС источника питания (транзисторного преобразователя). Это необходимо для проверки правильности разложения кривой ЭДС (рис. 2.3) в ряд Фурье с использованием

соотношений (2.3) (раздел 2.1). На рис. 3.28 представлено сравнение характерных расчетной и экспериментальной осциллограмм ЭДС. Причем для получения экспериментальной осциллограммы использовалась установка, выполненная по схеме рис. 3.18, а, с использованием в ее конструкции IGBT транзисторов и ее работе в режиме холостого хода ( $S_1 - S_3$  – отключены).



Рис. 3.28. Расчётная (слева) и экспериментальная (справа) осциллограмма напряжения полупроводникового преобразователя

Анализируя полученные результаты (рис. 3.21, рис. 3.24 – 3.28), следует типа используемых отметить влияние транзисторов на вид полученных При осциллограмм. переходе на использование В конструкции полупроводникового преобразователя IGBT транзисторов (вместо полевых) наблюдается увеличение амплитуды высокочастотной составляющей. Этот эффект можно объяснить тем, что преобразователь на IGBT транзисторах имеет существенно меньшую величину внутреннего сопротивления, в результате уменьшается его демпфирующее влияние на высокочастотные процессы в схеме установки. Кроме этого, можно сделать вывод о снижении амплитуды высокочастотных колебаний с повышением нагрузки, т.е. с уменьшением ее сопротивления, что также усиливает демпфирующее воздействие на эти процессы.

Хорошее согласование результатов расчета и эксперимента убедительно свидетельствуют о достоверности и эффективности предложенной методики расчета установившегося режима ЭТКПЧ, содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения, (раздел 2.1), основанной на применении частотного анализа, а также программно-алгоритмической реализации этой методики (раздел 3.2).

## **3.4.** Исследование работы электротехнического комплекса повышенной частоты в режиме холостого хода и короткого замыкания

Наряду с изучением нормальных рабочих режимов ЭТКПЧ представляет интерес проверка возможности использования предложенных (глава 2) теоретических разработок для изучения режимов холостого хода и короткого замыкания такой установки, так как эти режимы, как известно, могут представлять серьезную опасность для подобного электротехнического оборудования.

Опыт холостого хода проводился в двух вариациях, согласно рис. 3.19. В первом случае на конце кабельной линии электропередачи понижающий трансформатор (7) оставался подключенным, но нагрузка (5) на вторичной (низковольтной) обмотке была полностью отключена (рис. 3.19). Осциллограф (9) подключен на зажимах «а-b», ключи  $S_1$ - $S_2$  замкнуты,  $S_3$  разомкнут. В качестве кабельной линии применялся кабель РК-50, протяженностью 27 метров, а конструкции полупроводникового преобразователя были использованы IGBT-транзисторы. Расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения холостого хода представлены на рис. 3.29.



Рис. 3.29. Расчётная (слева) и экспериментальная (справа) осциллограмма напряжения на конце кабельной линии электропередачи повышенной частоты при наличии понижающего трансформатора (7), входное напряжение 250 В, частота напряжения 17 кГц; при осциллографировании высокого напряжения был использован делитель напряжения с коэффициентом деления 1:200 вместо стандартного 1:100, поэтому измеренные значения напряжения, указанные на осциллограмме необходимо умножать на 2

Во втором случае на конце кабельной линии электропередачи понижающий трансформатор (7) отключен, нагрузка (5) на вторичной (низковольтной) обмотке была полностью отключена (рис. 3.19). Осциллограф (9) подключен на зажимах «a-b», ключ  $S_1$  замкнут,  $S_2$ - $S_3$  разомкнуты. В качестве кабельной линии применялся кабель РК-50, протяженностью 27 метров Расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения холостого хода представлены на рис. 3.30.



Рис. 3.30. Расчётная (слева) и экспериментальная (справа) осциллограмма напряжения на конце кабельной линии электропередачи повышенной частоты при отключенном понижающем трансформатора (7) входное напряжение 250 В, частота напряжения 17 кГц: при осциллографировании высокого напряжения был использован делитель напряжения с коэффициентом деления 1:200 вместо стандартного 1:100, поэтому измеренные значения напряжения, указанные на осциллограмме, необходимо умножать на 2

рис. 3.29-3.30 Ha приведены характерные как расчетные, так И экспериментальные осциллограммы напряжения в конце кабельной линии U<sub>2</sub>, B, полученные в опытах холостого хода, которые свидетельствуют о появлении значительных перенапряжений режиме Анализ холостого хода. этих осциллограмм позволяет сделать вывод, что обнаруженные перенапряжения (рис. 3.29, 3.30) возникают за счёт существенного увеличения амплитуды высокочастотной составляющей (рис. 3.21) величина которой достигает 45÷50% напряжения. Одновременно ОТ амплитуды имеют место затруднения с классификацией обнаруженных перенапряжений, так как при их возникновении не происходит сброса нагрузки, аварийного режима и прочих ситуаций, приводящих возникновению перенапряжений. внутренних Возможно, К потребуется введение 0 новой разновидности внутренних понятия

перенапряжений, (квазистационарные) например, «стационарные коммутационные перенапряжения. Однако согласно [113], кратковременные всплески напряжения в момент изменения полярности напряжения обусловлены резким изменением величины тока в силовых ключах полупроводникового преобразователя напряжения. Причиной возникновения таких колебаний помимо тока высокой скорости изменения В ключах является также влияние индуктивности рассеивания и ёмкости обмоток трансформаторов и кабельной линии. В снижении таких перенапряжений смогут помочь специальные снабберные RC-цепи и драйверы управления полупроводниковыми приборами. Кроме того, указанные перенапряжения могут быть свидетельством наличия отраженных волн в кабеле при несогласованности волнового сопротивления кабеля (50 или 75 Ом) и нагрузки.

В ходе экспериментов осциллографировалось и измерялось напряжение в конце линии  $U_2$ , В, при изменении напряжения  $U_{BX}$ , В, (рис. 3.19), Результаты этого эксперимента представлены на рис. 3.31.



Рис. 3.31. Зависимости напряжения в конце кабельной линии от U<sub>BX</sub> (рис. 3.18) в различных вариантах режима холостого хода. □ – трансформатор подключен, △ – без трансформатора, 1 – область колебания величины рабочего напряжения U<sub>2</sub> при работе электропередачи под нагрузкой согласно рис. 3.16

Анализ рис. 3.31 позволяет сделать вывод, что работа электропередачи в режиме холостого хода представляет опасность, так как в этом случае напряжение на линии может заметно превышать значения этого параметра при работе

электропередачи под нагрузкой. Очевидно, что трансформатор на конце линии исполняет роль защитного устройства, позволяющего ощутимо снизить величину перенапряжений (рис. 3.29-3.31). Согласно сведениям, рис. 3.31 при значении напряжении U<sub>BX</sub>=220 В (номинальное значение) напряжение входного  $U_2$ достигает 1750÷1950 В (в зависимости от наличия трансформатора на конце линии). Напряжение U<sub>2</sub> электропередачи при работе под нагрузкой изменяется в пределах 1250÷1400 В (рис. 3.20). Таким образом, коэффициент кратности перенапряжений в режиме холостого хода составляет 1,3÷1,5. Для ограничения перенапряжений в ЭТКПЧ следует разработать ряд защитных мер в рамках дополнительных исследований. Анализируя расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжений в режиме холостого хода комплекса рис. 3.29, 3.30, можно говорить о хорошем совпадении результатов расчета и эксперимента. Это позволяет констатировать факт пригодности предложенной расчетной методики и программно-алгоритмической реализации (разделы 2.1 и 3.2) как для режима нормальной работы ЭТКПЧ, так и режима холостого хода без внесения каких-либо изменений.

Опыт короткого замыкания проводился также в соответствии с рис. 3.19. В качестве кабельной линии применялся кабель РК-75, протяженностью 30 м, ключи  $S_I$ - $S_3$  замкнуты, а рабочее напряжение на линии имело частоту 17 кГц. Эксперименты проводились при небольшой величине напряжения  $U_{6x}$  (рис. 3.19) (~6 В), с тем, чтобы величина тока на выходе преобразователя (поз. 4, рис. 3.19) была не более 1,6 А. Это необходимо для того, чтобы избежать повреждения низкоомного измерительного шунта  $R_{III}$  (поз. 5, рис. 3.19). Измерение тока  $I_{\kappa_3}$  производилось посредством осциллографирования падения напряжения  $U_{III}$  на этом шунте. В опытах были использованы два варианта конструктивного выполнения измерительного шунта:

• шунт в виде резистора промышленного изготовления мощностью 5 Вт и сопротивлением 1,5 Ом;

• шунт с бифилярной намоткой из нихромовой проволоки, сопротивление шунта – 0,809 Ом.

Зная сопротивление шунта и величину падения напряжения на нём, нетрудно вычислить значение тока, протекающего через шунт, т.е. тока короткого замыкания:

$$I_{K3} = \frac{U_{III}}{R_{III}}.$$
(3.5)

Результаты измерений опытных токов КЗ приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8	Измеренные	величины	при опыте КЗ	
-------------	------------	----------	--------------	--

Поромотри	Номер опыта			
Параметры	1 шунт	2 шунт		
Сопротивление шунта, Ом	1,5	0,806		
Амплитудное напряжение на шунте, В	3,68	1,9		
Амплитуда тока КЗ, А	2,453	2,357		

Построение расчетных осциллограмм производилось при следующих условиях: амплитуда ЭДС преобразователя напряжения 6 В; частота 17 кГц. Расчетные осциллограммы ЭДС и напряжений в различных точках ЭТКПЧ при коротком замыкании с использованием измерительного шунта  $R_{III}$  =1,5 Ом показаны на рис. 3.32.



Рис. 3.32. Характерные расчетные осциллограммы напряжений ЭТКПЧ при коротком замыкании ( $R_{ul} = 1,5$  Ом): 1 – ЭДС полупроводникового преобразователя, 2 – напряжение в начале кабельной линии, 3 – напряжение в конце кабельной линии, 4 – напряжение на шунте

Расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения на шунте  $U_{ul}$  в опыте короткого замыкания представлены на рис. 3.33.



Рис. 3.33. Расчётная (слева) и экспериментальная (справа) осциллограмма напряжения на шунте  $U_{ul}$  (5) в режиме КЗ электротехнического комплекса с  $R_{ul} = 1,5$  Ом

Расчетные осциллограммы напряжений в ЭТКПЧ в режиме работы при коротком замыкании со вторым шунтом ( $R_{u2} = 0,806$  Ом) показаны на рис. 3.34.



Рис. 3.34. Характерные расчетные осциллограммы напряжений ЭТКПЧ при коротком замыкании (*R*<sub>*ш*2</sub> = 0,806 Ом): 1 – ЭДС полупроводникового преобразователя, 2 – напряжение в начале кабельной линии, 3 – напряжение в конце кабельной линии, 4 – напряжение на шунте

Расчетные и экспериментальные осциллограммы напряжения на шунте  $U_{u2}$  в опыте короткого замыкания представлены на рис. 3.35.



Рис. 3.35. Расчётная (слева) и экспериментальная (справа) осциллограмма напряжения на шунте *U*<sub>*u*2</sub> (5) в режиме КЗ электротехнического комплекса с *R*<sub>*u*2</sub> = 0,806 Ом

Расчетные осциллограммы токов короткого замыкания *I*<sub>к3</sub> при проведении опытов короткого замыкания в ЭТКПЧ с шунтами № 1, 2 (табл. 3.8) представлены на рис. 3.36.



Рис. 3.36. Расчётные осциллограммы токов короткого  $I_{\kappa_3}$  замыкания в электротехническом комплексе соответственно с применением шунтов №1  $R_{ul}$ =1,5 Ом и шунта №2 с  $R_{u2}$ =0,806 Ом

Из рис. 3.32 – 3.36 можно сделать вывод о «пилообразной» форме изменения тока короткого замыкания. Такая форма осциллограммы тока объясняется тем, что характер изменения во времени тока короткого замыкания обусловлен в

155

основном влиянием последовательно соединенных индуктивностей (индуктивности рассеяния, индуктивности линии – рис. 2.4), падение напряжения на которых, вычисляется, как известно, по формуле:

$$U_m = L \frac{di}{dt}, \tag{3.6}$$

где L – суммарная индуктивность цепи, Гн,  $U_m$  – максимальное напряжение, В.

После разделения переменных и интегрирования получим линейную зависимость тока короткого замыкания и, естественно, падения напряжения на измерительном шунте от времени в пределах длительности амплитудного значения ЭДС (рис. 2.3):

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m}{L};$$

$$I_{K3} = i = \frac{U_m}{L} \int_0^t dt = \frac{U_m}{L} \cdot t;$$

$$U_{III} = R_{III} i = \frac{R_{III}U_m}{L} \cdot t.$$
(3.7)

Наличие емкостей в схеме замещения (рис. 2.4) приводит к искажению линейного характера изменения этих величин, как показано на рис. 3.32–3.36. Таким образом, результаты расчета и эксперимента, полученные в опытах короткого замыкания, соответствуют общим физическим представлениям о процессах, происходящих в исследуемой установке, при таком режиме ее работы. Это является дополнительным подтверждением достоверности предложенной и использованной расчетной методики.

Расчетные осциллограммы, представленные на рис. 3.36, свидетельствуют о слабом влиянии величины измерительного шунта: при уменьшении в опытах величины  $R_{III}$  практически вдвое амплитуда тока короткого замыкания возрастает на 2–3 %. Это означает: наличие измерительного шунта в месте короткого замыкания не может привести к серьезным ошибкам в опытах, т.е. полученным результатам можно в полной мере доверять, а расчетную методику можно применять при условиях, отличных от условий опытов.

Практический интерес представляет оценка токов короткого замыкания при максимальной величине напряжения на входе полупроводникового преобразователя напряжения  $U_{ex} = 250$  В. Расчетные осциллограммы напряжений и токов короткого замыкания для такого режима с шунтом  $R_{u} = 1,5$  Ом приведены на рис. 3.37 и 3.38.



Рис. 3.37. Характерные расчетные осциллограммы напряжений ЭТКПЧ при коротком замыкании при номинальном значении входного напряжения в 250 В ( $R_{ul} = 1,5$  Ом): 1 – ЭДС полупроводникового преобразователя, 2 – напряжение в начале кабельной линии, 3 – напряжение в конце кабельной линии, 4 – напряжение на шунте



Рис. 3.38. Расчетная осциллограмма тока короткого замыкания ЭТКПЧ при номинальном значении входного напряжения в 250 В (*R<sub>ul</sub>* = 1,5 Ом)

По результатам осциллограммы рис. 3.38 можно сделать вывод о превышении тока короткого замыкания над длительным током коллектора  $I_{\kappa} = 50$  (A) IGBT транзисторов (IRG4PSH71UDPBF), применяемых в ЭТКПЧ. Таким образом, требуется дальнейшая проработка методов защиты ЭТКПЧ от режима короткого замыкания в нагрузке, и от работы полупроводникового преобразователя Представленные напряжения на низкоомную нагрузку. расчетные И экспериментальные осциллограммы рис. 3.32–3.38, как и в случае анализа нормальных режимов работы, режима холостого хода, так и в случае режима короткого замыкания подтверждают правильность выполнения расчетной модели ЭТКПЧ (разделы 2.1, 3.2.) и целесообразность применения методики частотного анализа для расчета электрических цепей, содержащих полупроводниковые преобразователи напряжения.

#### 3.5. Выводы по главе 3

1. Высоковольтные силовые трансформаторы повышенной частоты по всем рассмотренным показателям значительно превосходят трансформаторы промышленной частоты, что обеспечивает предпосылки к их применению в составе локальных ЭТКПЧ, предназначенных для создания систем централизованного промышленного электропитания объектов токами И напряжениями повышенной частоты.

2. Высокие значения КПД силовых трансформаторов повышенной частоты, приближающиеся к 99,5%, опровергают достаточно распространённое мнение об увеличении потерь электроэнергии в случае применения несинусоидального рабочего напряжения повышенной частоты.

3. Приведенная методика определения потерь энергии трансформатора в опытах XX и КЗ неэлектрическим способом показывает себя как весьма удобный и эффективный инструмент, сочетающий преимущества калориметрического метода и метода измерения мощности на СВЧ.

4. Полностью подтверждается достоверность расчётных методик (глава 2) определения ёмкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты, а также потерь мощности в этих устройствах.

5. Экспериментальные результаты, полученные на лабораторных моделях ЭТКПЧ в различных режимах работы (под нагрузкой, режим холостого хода и короткого замыкания), полностью подтверждают достоверность методики расчета установившихся электрических режимов, основанной на применении частотного анализа (глава 2).

6. Результаты экспериментальных исследований лабораторного ЭТКПЧ подтвердили основные отличительные особенности предложенной методики электрического расчета установившихся режимов на основе частотного анализа (влияние частоты гармоник на величину активных сопротивлений схемы замещения и на величину внутреннего сопротивления преобразователя, учет реальной формы осциллограммы ЭДС источника (рис. 2.3)).

7. Разработанная программно-алгоритмическая реализация методики численно-аналитического электротеплового расчета силовой высоковольтной кабельной линии электропередачи в составе ЭТКПЧ является простым и доступным инструментом для выполнения инженерных расчётов в среде Matlab.

### Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

# 4.1. Определение рабочего напряжения кабельной линии электротехнического комплекса повышенной частоты

Обоснованный выбор величины высокого рабочего напряжения кабельных линий повышенной частоты является одним из основных вопросов в применении рассматриваемых ЭТКПЧ как локальных устройств централизованного промышленного электропитания. Расчетная методика выбора величины рабочего напряжения таких линий, представленная в разделе 2.2, позволяет это вычислить. Олнако обязательным условием применения методики является наличие сведений электрической экспериментальных об прочности изоляции, применяемой в таких кабельных линиях.

Поэтому в целях проверки предложенной методики выбора рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты (раздел 2.2) и предварительной оценки влияния на его величину различных факторов были выполнены экспериментальные исследования показателей электрической прочности полимерной изоляции кабеля типа PK-50. Конструкция опытных образцов, использованных при испытаниях, представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Образец кабеля для испытаний. 1 – внутренний проводник (d/2 = 0.5 мм); 2 – полимерная изоляция (D/2 = 1.5 мм); 3 – участок оболочки (оплетки)  $\ell_{OEP} = 50$  мм, d – диаметр внутреннего проводника (жилы кабеля), D – наружный диаметр изоляции кабеля

В ходе испытаний определялось пробивное напряжение  $U_{np}$ , кВ, изоляции образцов при плавном повышении испытательного напряжения промышленной частоты со скоростью около 1 кВ/сек и подаче высокого напряжения на жилу кабеля (оплетка заземлена).

Для определения показателей «кривой жизни», т.е. зависимости пробивного напряжения (электрической прочности) от длительности воздействия высокого напряжения, изоляции образцы кабельной изоляции подвергались длительному старению посредством воздействия высокого переменного напряжения 50 Гц величиной 6 кВ. Результаты экспериментов представлены в табл.4.1.

τ, мин	$\overline{U_p}$ ,	σ, κΒ	σ*, %	tg δ, %	$\overline{E_p}$ ,	
1	кВ 36.6	2.2	6.01	0.02	KB/MM 36.63	
1500	31.2	6.7	21.5	0.018	31.2	
4920	29.6	4.28	10.2	0.02	29.6	

Таблица 4.1. Результаты исследования электрической прочности

На основании сведений табл. 4.1 построена «кривая жизни» испытанной полимерной изоляции (рис. 4.2).



В результате обработки полученных результатов (табл. 4.1, рис. 4.2) установлено, что эта зависимость описывается функцией следующего вида:

$$\overline{E_p} = 36.68 - 0.797 \ln \tau \,. \tag{4.1}$$

С использованием формулы (4.1) были вычислены значения постоянных коэффициентов соотношения (2.33), описывающего «кривую жизни» изоляции:

162

m = 41,2 и B = 
$$3.21 \cdot 10^{64} \left( \text{мин} \left( \frac{\kappa B}{\text{мм}} \right)^m \right).$$

Знание этих параметров позволило с помощью соотношения (2.52) рассчитать зависимость максимального рабочего напряжения  $U_{PAE}^{\text{max}}$ , кВ, от величины срока службы  $\tau = \tau_{CT}$ , мин, и длины кабельной линии  $\ell = \ell_K$ , м, для заданных значений эксплуатационной надежности. Вычисления производились для частоты рабочего напряжения f = 13000 Гц [141, 145], которая соответствует также наивысшему значению КПД силовых трансформаторов повышенной частоты [108, 110, 111], а среднеквадратичное отклонение взято как усредненное по табл. 4.1:  $\sigma^* = 12,5$  %. Одновременно определялось максимальное значение мощности, передаваемой по кабельной линии:

$$S_{\max} = U_{PAB}^{\max} I_{\partial on} = U_{PAB}^{\max} J_{\partial on} F = \frac{U_{PAB}^{\max} J_{\partial on} \pi d^2}{4}, \qquad (4.2)$$

где  $J_{\partial on} = 2$  А/мм<sup>2</sup> – максимально допустимое значение плотности тока в токоведущей жиле по условиям нагрева [117]. Значение расчетной кратности перенапряжений принято равным  $K_{np} = 4,5$ , что соответствует электрическим сетям класса напряжений 6–10 кВ промышленной частоты [114, 117]. Результаты расчетов представлены на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Зависимость максимального рабочего напряжения (а) и максимальной передаваемой мощности (б) высоковольтной кабельной линии РК-50 повышенной частоты от её протяженности и срока службы при *P* = 0,999

Анализ рис. 4.3 позволяет сделать вывод, что по мере увеличения расчётного срока службы  $\tau_{C/l}$  и протяжённости кабельной линии  $\ell$ , м, наблюдается заметное  $U_{PAE}^{\mathrm{max}}$ , значений рабочего напряжения снижение максимальных κВ. И передаваемой мощности S<sub>max</sub>, ВА. Однако влияние второго фактора (*l*) следует признать, как более значительное. Оценка производственных условий [108] кабеля (рис. 4.1) возможного практического использования испытанного позволяет сделать вывод, что его длина  $\ell$  не будет превышать 50-70 м. В этом случае согласно рис. 4.3 максимальное рабочее напряжение кабельной линии для заданного типа кабеля (рис. 4.1) находится в пределах 2,4–2,9 кВ, а предельная передаваемая мощность в интервале 3,7-4,5 кВА. Сравнение этих показателей с возможными производственными потребностями позволяет заключить, что одной электропередачи, например, с использованием испытанного кабеля (рис. 4.1) вполне достаточно для одновременной ЭТО таких распространённых изделий, как колодезные железобетонные кольца в количестве 4-5 шт. [142]. Кроме того, существует перспектива значительного повышения показателей (рис. 4.3) высоковольтной кабельной линии за счет снижения расчетной кратности перенапряжений  $K_{\Pi P}$  (2.52) в сетях повышенной частоты в 2-3 раза, как показали результаты выполненных исследований (разд. 3.3.3). Значительного увеличения рабочего напряжения и передаваемой мощности можно достичь применением других типов кабелей (как средне-, так и крупногабаритных) из существующего типоразмерного ряда таких изделий [109].

На практике обычно представляют интерес дискретные значения  $\tau = \tau_{CT}$ , зависимости рис. 4.3а представлены в более удобной для практического использования форме, показанной на рис. 4.4. Кроме этого, рис. 4.4 дает также представление о влиянии такого важного параметра, как эксплуатационная надёжность *P* изоляции. Например, увеличение этого параметра с 0,9 до 0,9999999 (т.е. увеличение надёжности изоляции в 10 000 раз) требует снижения рабочего напряжения всего на 10–13% почти независимо от протяженности кабельной линии и срока службы изоляции. Зависимости на рис. 4.4 демонстрируют отчетливую тенденцию к достижению установившегося значения рабочего

напряжения по мере увеличения длины кабельной линии. Это открывает возможность унификации значений рабочего напряжения по типам существующих кабелей.



Рис. 4.4. Зависимость максимального рабочего напряжения высоковольтной кабельной линии повышенной частоты от её протяженности

Представляет интерес сравнение полученных результатов (рис. 4.4) с оценками по традиционной методике [72]. Для силовых кабелей 50 Гц с полиэтиленовой изоляцией толщина фазной электрической изоляции определяется формуле [72]:

$$\Delta_{\mu_3} = U_{\phi_{50}\Gamma_{\mu}} / E_{CP} , \qquad (4.3)$$

где  $U_{\phi 50\Gamma u}$  – фазное напряжение (эффективное значение);  $E_{cp}$ = 2,5 MB/м – средняя напряженность поля в изоляции, численное значение которой принято на основании обобщения опыта конструирования и эксплуатации кабелей с такой изоляцией [72]. С помощью соотношения (4.3) нетрудно определить величину фазного напряжения кабеля (рис. 4.1,  $\Delta_{u3}$ =1 мм), для которого выполнены расчеты (рис. 4.4):

$$U_{\Phi 50\Gamma \mu} = \Delta_{H3} E_{CP} = 2,5 \text{ kB.}$$
(4.4)

Это значение также отмечено на рис. 4.4 и качественно согласуется с результатами, полученными для повышенной частоты.

Предложенная методика выбора рабочего напряжения (раздел 2.2) высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ по известным

электрической прочности кабельной характеристикам изоляции после соответствующей переработки может быть использована и для решения обратной задачи: выбора изоляции (разработки требований к изоляции) кабельной линии при известной величине рабочего напряжения. В обоих вариантах эту методику следует рассматривать как составную часть общей методологии конструирования и эксплуатации высоковольтных кабельных электропередач переменного тока повышенной частоты, разработка которой становится актуальной задачей как в составе ЭТКПЧ, так и в применении к другим областям электротехники. Для окончательного выбора рабочего напряжения кабельной линии необходимо учитывать влияние многих других факторов – это допустимое значение напряженности электрического поля на центральной жиле кабеля, характер распределения напряженности поля в толще изоляции, величина диэлектрических потерь и их распределение в объеме изоляционного материала, температурные характеристики кабеля нормальных аварийных режимах работы В И электропередачи и т.д. [108, 117]. Полезными могут оказаться также сведения о характере физико-химических процессов в различных видах кабельной изоляции при воздействии высокого напряжения [111, 141, 143, 145]. Такая методология эффективным инструментом разработки и упорядочивания станет также нормативной базы, регламентирующей создание и профилактику высоковольтной изоляции электроэнергетического оборудования, что является актуальной задачей настоящее время [143].

#### 4.2. Проведение экспериментальных исследований установившихся режимов работы электротехнического комплекса повышенной частоты в производственных условиях

Выполненные теоретические и лабораторные экспериментальные исследования (глава 3, раздел 4.1) обеспечили благоприятные условия для создания и проведения испытаний в производственных условиях действующего

165

макета ЭТКПЧ, предназначенного для организации локальных систем централизованного промышленного электропитания.

эксперимента Местом проведения является цех по изготовлению железобетонных конструкций (фундаментных блоков, межэтажных блоков вентиляции и лифтовых шахт, железобетонных колец, забивных свай и т.п.) сборного железобетона. крупного предприятия Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.5 и предназначена для ЭТО железобетонного изделия токами повышенной частоты В процессе его изготовления [26-29, 122, 135, 140, 142, 144].



Рис. 4.5. Электрическая схема установки для экспериментов в условиях действующего производства 1 – питающая сеть промышленного предприятия; 2 – счетчик электрической энергии; 3 – полупроводниковый управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – нагрузка; 6, 7 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы; 8 – высоковольтная кабельная линия; 9 – делитель напряжения,  $10 - t^{\circ}$  – термометр, состоящий из блоков типа TC-1088 и ИКСУ-260, 11 – система управления выпрямителем

Питание установки производится от сети промышленной частоты 50 Гц напряжением 220 В через счетчик потребленной электрической энергии (2). Мощность с выхода преобразователя 4 передается в нагрузку 5 через силовые трансформаторы 6, 7 и кабельную линию 8 (высоковольтную электропередачу). Номинальная мощность силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты 6, 7 (рис. 4.5) составляла ~ 3 кВА, номинальное напряжение низковольтной/высоковольтной обмотки – 0,25/1,25 кВ. В качестве высоковольтной кабельной линии 8 (рис. 4.5) использовался кабель типа РК-75  $l_{K} = 30$  м. Частота выходного напряжения транзисторного преобразователя напряжения f<sub>1</sub> составила 13 кГц, в конструкции преобразователя применялись мощные IGBT транзисторы типа IRG4PSH71UDPBF. Следует отметить, что в случае реального применения ЭТКПЧ в условиях действующего производства, выпрямитель 3 имеет другую конструкцию и может выполняться трехфазным для подключения к сети трехфазной сети 0,4 кВ. Обрабатываемое изделие (нагрузка 5) представляет собой фундаментный блок, имеющий размеры 1100x580x400, для изготовления которого с использованием ЭТО электродным методом используется опалубка, выполненную из диэлектрических материалов с теплоизоляцией (ламинированная фанера с пенопластом). Опалубка до укладки в нее бетона и после укладки показана на рис. 4.6.



в)
 Рис. 4.6. Опалубка для ЭТО бетона при испытании ЭТКПЧ: а – до укладки бетона; б – после укладки свежего бетона; в – распалубка с готовым изделием после ЭТО

Общий вид ЭТКПЧ (обозначения согласно рис. 4.5) при проведении эксперимента в условиях действующего производства представлен на рис. 4.7.



Рис. 4.7. ЭТКПЧ в ходе эксперимента в производственных условиях 1 – питающая сеть промышленного предприятия; 3 –управляемый полупроводниковый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 4 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 5 – обрабатываемое изделие (фундаментный блок); 6, 7 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы; 8 – высоковольтная кабельная линия; 9 – делитель напряжения, ЭО – электронный осциллограф в момент осциллографирования высокого напряжения в конце кабельной линии

После укладки свежего бетона в специальную опалубку (рис. 4.6), выполненную из диэлектрических материалов с теплоизоляцией, снабженную (подключены встроенными электродами к выходу понижающего трансформатора), и включения установки в работу в толще бетона (бетон класса В12) начинает протекать ток повышенной частоты. Вследствие диэлектрических потерь в бетоне происходит преобразование электрической энергии в тепловую и разогрев изделия до необходимой температуры. Затем следует стадия изотермической выдержки при постоянной температуре, после чего подача электроэнергии прекращается и происходит естественное охлаждение изделия. В ходе эксперимента измерялась энергия W<sub>BX</sub>, Дж, полученная из питающей сети, значения тока  $I_{ex}$ , A, и напряжения  $U_{ex}$ , B, в звене постоянного тока (т.е. на входе транзисторного преобразователя напряжения) и температура изделия в различных точках T<sub>i</sub>, °C. Для анализа режима работы ЭТКПЧ применяется усредненное значение температуры  $T_{\Sigma}$ , °С. Результаты измерений представлены в таблице 4.2.

τ,	I <sub>BX</sub> ,	U <sub>BX</sub> ,	P <sub>bx,</sub>	T <sub>1</sub> ,	T <sub>2</sub> ,	T <sub>3</sub> ,	Τ4,	Τ <sub>Σ</sub> ,
МИН	А	В	кВт	°C	°C	°C	°C	°C
0	9	245	2,205	23	23	23	23	23
30	9	227	2,043	25	24	28	24	25,25
60	9,5	224	2,128	30	29	34,5	29	30,6
90	9,5	213	2,023	35	34	41	33	35,75
120	9.5	213	2.023	40	40	46	38	41

На рис. 4.8 представлены зависимости изменения во времени входных тока, напряжения и мощности  $P_{ex} = U_{ex}I_{ex}$ , передаваемой от управляемого выпрямителя в полупроводниковый преобразователь напряжения (рис. 4.5), полученные в процессе ЭТО фундаментного блока 1100х580х400 мм. Как следует из табл. 4.2 и рис. 4.8, 4.9, измерения в ходе эксперимента производились через одинаковые промежутки времени 30 мин. При этом на каждом из этих временных отрезков электрические параметры  $I_{ex}$ ,  $U_{ex}$ ,  $P_{ex}$  оставались практически неизменными и происходило постепенное увеличение температуры изделия.

аолица ч.2. тезультаты эксперимента

Таблица 4.2. Результаты эксперимента



Рис. 4.8. Изменение электрических параметров ЭТКПЧ ( $U_{ex}$ ,  $I_{ex}$ ,  $P_{ex}$ ) во времени в процессе ЭТО железобетонного изделия

На рис. 4.9 показано изменение температуры материала во времени от начала ЭТО и до окончания процесса подачи напряжения к опалубке.





Значение энергии, переданной в объект обработки, т.е. энергии, полученной на выходе ЭТКПЧ (полезной энергии), в течение каждого (*i*-го) временного интервала определяется по формуле [137]:

$$W_{BbIXi} = c_{\delta} m_{\delta} (T_{K} - T_{H}) + c_{\phi} m_{\phi} (T_{K} - T_{H}), \qquad (4.5)$$

где  $c_{\delta}$  и  $c_{\phi}$  – удельная теплоемкость бетона и опалубки (ламинированной фанеры), Дж/(кг·К);  $m_{\delta}$  и  $m_{\phi}$  – масса бетонного блока и опалубки (за вычетом теплоизоляции и наружной общивки), кг;  $T_H$  и  $T_K$  – начальная и конечная температура на каждом (*i*-м) временном участке (рис. 4.8, 4.9).

172

Величина энергии, переданной в ЭТКПЧ, в пределах каждого временного участка нетрудно определить по известной формуле:

$$W_{BXi} = P_{BXi} \cdot \Delta \tau , \qquad (4.6)$$

где  $P_{exi}$  — мощность на входе полупроводникового преобразователя в определенный интервал времени (рис. 4.8), Вт,  $\Delta \tau$  — длительность временного участка между последовательными измерениями (30 мин), с,

Таким образом, КПД технологического процесса в *i*-ый период времени вычисляется как:

$$\eta = W_{BbIXi} / W_{BXi} \tag{4.7}$$

Для получения средневзвешенного значения КПД (рис 4.10) за весь период работы ЭТКПЧ повышенной частоты использовались показатели, полученные в интервале времени от 0 (момент включения установки) до очередного момента регистрации результатов эксперимента (табл. 4.2).



Рис. 4.10. Зависимость КПД процесса ЭТО с применением ЭТКПЧ

Достижение КПД ЭТКПЧ значений 90% на стадии ЭТО с 90 до 120 минут обуславливается экзотермическими (с выделением тепла) реакциями в бетонной смести [25, 26, 28, 29].

Осциллограммы напряжений ЭТКПЧ по время ЭТО железобетонных изделий представлены на рис. 4.11.



Рис. 4.11. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) осциллограммы напряжений ЭТКПЧ в производственных условиях ЭТО: а – напряжение в начале кабельной линии, б – в конце кабельной линии, в – напряжение на нагрузке;  $U_{ex} = 227$  В, f = 13 кГц, РК-75  $l_k = 30$  м

Удовлетворительно согласование расчетных и экспериментальных осциллограмм (рис. 4.11) является дополнительным подтверждением достоверности предложенной методики частотного анализа (разделы 2.1, 3.2) для электрического расчета установившихся процессов в ЭТКПЧ.

По проведенных результатам экспериментальных исследований В производственных условиях и выполнения ЭТО железобетонных изделий можно сделать вывод о высокой эффективности ЭТКПЧ: его КПД к моменту завершения ЭТО достигает значений 90% (рис. 4.10), хотя по истечении первых 30 мин этот показатель имеет сравнительно небольшую величину (около 40%). Такой результат обусловлен особенностью физико-химических процессов в твердеющем бетоне В процессе его электроразогрева. Ha начальном этапе ЭТО (приблизительно первые 30 мин) в бетонной смеси преобладают химические превращения, которые сопровождаются потреблением тепловой энергии [25, 122]. Поэтому значительная часть электроэнергии, подведенная в обрабатываемому изделию и преобразованная в тепло при протекании электрического тока в толще бетона [25, 122] расходуется не на повышение температуры материала изделия, а на осуществление этих химических реакций (рис. 4.8 и 4.10), что обуславливает сравнительно невысокое значение КПД. В дальнейшем, по мере увеличения температуры материала вследствие объемно-однородного разогрева изделия начинают преобладать химические процессы со значительным выделением тепла, которое добавляется тепловой энергии ЭТО, что приводит к существенному повышению КПД (рис. 4.10) и ускорению роста температуры (рис. 4.8).

Сопоставление экспериментальных данных и расчетных зависимостей (рис. 4.11) говорит об их хорошем согласовании, а значит и об адекватности предложенной математической модели (главы 2, 3) ЭТКПЧ в том числе его компонентов (силовых высоковольтных трансформаторов и кабельных линий электропередачи повышенной частоты). Имеются все основания сделать вывод о технической возможности и целесообразности применения таких локальных ЭТКПЧ в системах централизованного промышленного электропитания.

174

# 4.3. Исследование температурных режимов высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты

Эксперимент, проведенный в производственных условиях, (раздел 4.2) позволяет выполнить проверку достоверности предложенной численноаналитической методики электротеплового расчета режимов работы высоковольтного кабеля повышенной частоты (раздел 2.3), а также сделать выводы по результатам практического применения этой методики.

С использованием этой расчетной методики (раздел 2.3) и программного комплекса (раздел 3.2, Приложение В) были получены расчетные характеристики установившегося температурного режима высоковольтного кабеля при работе под нагрузкой. При вычислениях количество гармоник, участвующих в разложении Фурье (2.64) при описании воздействующего на изоляцию кабеля высокого напряжения осциллограммы, представленной на рис. 2.4, в («трапеция с паузой»), было принято равным  $N_K$ =30, а число слоев (рис. 2.12) *m*=100. Предварительные расчеты показали, что при таких значениях этих параметров погрешность вычислений не превышает 0,001%.

вычислений В результате получены характеристики распределения температуры по толщине изоляции и предельной величины электрического тока в жиле I<sub>max</sub> для кабеля типа РК-75 с полиэтиленовой изоляцией при различных значениях амплитуды рабочего несинусоидального напряжения, использованного ЭТКПЧ (раздел 4.2). Вычисления проводились составе для значений В температуры  $T_{\mathcal{H}}^{max} = 70^{\circ}$ С (343 К) и  $T_{e} = 40^{\circ}$ С (313 К), принятые, как предельно допустимые эксплуатационные температурные показатели для такой изоляции [72], т.е. предполагается, как показали предварительные расчеты (раздел 3.2), что максимальная температура в изоляции кабеля возникает на поверхности жилы. В расчетах учитывалось влияние температуры на величину  $tg\delta$ , которое для полиэтилена марки ПЭВД, широко применяемого в качестве изоляции, можно описать с помощью полинома [124]:

 $tg\delta(T) = 5 \cdot 10^{-13}T^5 - 2 \cdot 10^{-10}T^4 + 2 \cdot 10^{-8}T^3 - 9 \cdot 10^{-7}T^2 + 3 \cdot 10^{-5}T + 0.0001,$  (4.8) где T – температура материала в °C. Результаты вычислений представлены на рис. 4.12, из которого можно сделать вывод, что по мере увеличения амплитуды рабочего напряжения  $U_m$  наблюдается снижение предельно допустимого тока в жиле кабеля вплоть до того, что при некотором значении  $U_m^{\text{max}}$  достигается  $I_{\text{max}} = 0$ .



Рис. 4.12. Изменение температуры по толщине изоляции кабеля типа РК-75 при различных значениях амплитуды рабочего напряжения повышенной частоты f = 13,3 кГц: 1 - U = 1 кВ ( $I_{max} = 4,9$  A); 2 - U = 5 кВ ( $I_{max} = 3,64$  A); 3 - U = 7,413 кВ ( $I_{max} = 0$  A); 4 - напряжение U = 10 кВ >  $U_m^{max}$ 

Практически это означает, что на кабель можно подать только напряжение такой величины, а передавать мощность по нему без риска превысить предельные для изоляции температурные показатели уже нельзя. На рис. 4.12 представлена для сравнения кривая изменения температуры для  $U_m > U_m^{max}$ , которую следует считать гипотетической, т.к. для ее реализации требуется наличие теплоотвода от жилы кабеля. Технически это возможно и применение такого технического решения в будущем не исключается. Однако в этом случае необходимо считаться с тем, что опасный для изоляции нагрев будет возникать не на поверхности жилы, а в толще изоляционного материала. В результате расчета зависимостей вида рис. 4.12 были получены зависимости максимально допустимого тока в жиле кабеля  $I_{max}$  и приблизительного значения максимальной передаваемой по нему мощности, ВА:

$$S_{\max} = U_{\max} I_{\max} \tag{4.9}$$

от амплитуды рабочего напряжения  $U_{max}$ , кВ, которые представлены на рис. 4.13. Там же отмечено значение предельно допустимого тока промышленной частоты  $I_{max}^{50}$ .



Рис. 4.13. Зависимости максимально допустимого тока и передаваемой мощности кабельной линии от амплитуды рабочего напряжения: 1 – предельно допустимый рабочий ток повышенной частоты ( $f = 13,3 \text{ к}\Gamma\mu$ )  $I_{max}$ ; 2 – предельно допустимый рабочий ток промышленной частоты  $I_{max}^{50}$ ; 3 – максимальное значение передаваемой мощности  $S_{max}$ 

На рис. 4.13 сплошными линиями представлены результаты вычислений с использованием значения  $\alpha_{KOH}$ , указанного в формуле (2.67), а пунктирные линии с заштрихованной областью показывают пределы отклонения расчетных величин с учетом возможного колебания этого параметра согласно литературным источникам [72, 119, 121].

Анализ рис. 4.13 позволяет сделать вывод, что методика оценки предельных токовых нагрузок кабелей, используемая при напряжении 50 Гц [72], дает существенно завышенные значения  $I_{\text{max}}^{50} > I_{\text{max}}$ . В кривой 3 (рис. 4.13) для  $S_{\text{max}}$ наблюдается максимум, который позволяет рассматривать соответствующее ему напряжение, по-видимому, как оптимальное значение (5,1-5,2 кВА). Полученные результаты вычислений (рис. 4.13) определяют целесообразность проведения в дальнейшем всесторонних исследований характеристик кабельных высоковольтных линий повышенной частоты, в том числе и с помощью предложенной методики, с целью оптимизации конструкции и режимов работы таких линий. Достоверность предложенной методики необходимо проверить с помощью эксперимента. Из-за малого поперечного размера кабеля типа РК-75 (рис. 4.7) экспериментальное определение температурного поля в его изоляции представляет весьма сложную задачу и единственный параметр, доступный для

измерений – это значение температуры на поверхности кабеля  $T_{\mu a p}$  при его длительной работе в составе ЭТКПЧ, что имело место при выполнении эксперимента в производственных условиях (раздел 4.2). На рис. 4.14 представлена расчетная зависимость T<sub>нар</sub> от температуры окружающего воздуха T<sub>в</sub>, полученная с помощью предложенной методики (рис. 4.14), а также результаты измерения температуры термопарой с помощью приборов В составе термометра сопротивления ТС-1088 и калибратора-измерителя унифицированных сигналов эталонного ИКСУ-260 при значениях рабочего напряжения и тока, которые были получены в эксперименте. Сплошная и пунктирные линии, а также заштрихованная область (рис. 4.14) имеют тот же смысл, что и для рис. 4.13. Результаты рис. 4.14 позволяет сделать вывод о приемлемом согласовании результатов расчета и эксперимента, что, однако, не исключает дополнительной проверки расчетной методики и ее возможного усовершенствования в дальнейшем.



Рис. 4.14. Зависимость наружной температуры  $T_{\mu ap}$  высоковольтного кабеля типа РК-75 от температуры окружающего воздуха  $T_B$  при  $U_m = 1250$  В и I = 1,62 А (f = 13,3 кГц). Линия – расчет, точка – эксперимент

Особенностью рассмотренной методики расчета температурных характеристик коаксиального кабеля является отсутствие учета тепловых потерь от тока, протекающего в оплетке кабеля. Однако согласно [72, 119, 145] выражение (2.67) косвенно учитывает влияние этого фактора, что подтверждается соотношением результатов расчета и измерений (рис. 4.14).

### 4.4. Исследование показателей эффективности электротехнических комплексов повышенной частоты

Показатели энергетической эффективности как полупроводникового преобразователя, так и ЭТКПЧ в целом были исследованы применительно к установке, схема которой показана на рис. 3.18. Расчетные показатели энергетической эффективности определялись с помощью методики, представленной в разделе 2.5. При экспериментальном определении этих показателей по результатам измерений тока и напряжения в звене постоянного тока (рис. 3.18) по аналогии с выражением (3.7) рассчитывалось значение энергии (входной), переданной в полупроводниковый преобразователь напряжения, по формуле:

$$W_{BX} = U_{=}I_{=}\Delta\tau = P_{BX}\Delta\tau, \qquad (4.10)$$

где  $U_{=}$  и  $I_{=}$  – напряжение и ток (рис. 3.18а) на входе полупроводникового преобразователя (поддерживаются неизменными в ходе измерений),  $\Delta \tau$ – длительность работы установки (отсчитывается от момента ее включения). Электроэнергия, переданная в нагрузку 5 (рис. 3.18а) при работе установки, преобразуется в тепловую и приводит к нагреву теплоносителя (воды), температура которого периодически регистрируется с помощью термометра  $t^{\circ}$  (рис. 3.18а). В этом случае полезная энергия, переданная в нагрузку, определяется суммированием энергии затраченной на нагрев объекта и энергии потерь тепла в окружающую среду через его поверхность, т.е. теплоизоляцию, и рассчитывается по формуле:

$$W_{BbIX} = C_B m_B (T_K - T_H) + C_E m_E (T_K - T_H) + q_S F \Delta \tau , \qquad (4.11)$$

где  $m_B$  и  $m_E$  – масса воды и масса используемой для нее емкости,  $C_B$  и  $C_E$  – удельная теплоемкость воды и материала емкости (стали),  $T_H$  =20–25 °C – начальная температура объекта,  $T_K$  = 50–55°C – конечная температура (по истечении промежутка времени  $\Delta \tau$  =12–40 мин),  $q_S$  – плотность теплового потока потерь через поверхность объекта (рассчитывается с использованием существующих методов теплопереноса, например, рассмотренных в [119, 137]), F – площадь поверхности емкости с теплоносителем.

Результаты измерений, полученные в ходе опытов, позволяют рассчитать значения входной и полезной энергии по формулам (4.10) и (4.11), соответственно и определить опытное значение КПД:

$$\eta = \frac{W_{BbIX}}{W_{BX}}.$$
((4.12))

Точность экспериментального определения значения КПД может быть найдена, как погрешность косвенного измерения этого параметра через погрешности измерения величин, входящих в формулы (4.10) – (4.12) [118]. В результате выполненных оценок с учетом известных значений погрешности измерения использованных приборов и методов (например, для измерения  $U_{=}$  и  $I_{=}$  были использованы приборы класса точности 0,1), погрешность определения КПД составляет величину порядка 0,5–0,55%. Установка для экспериментальных исследований показателей энергетической эффективности ЭТКПЧ согласно рис. 3.186 представлена на рис. 4.15.



Рис. 4.15. Экспериментальная установка для определения показателей энергетической эффективности ЭТКПЧ (рис. 3.18, б): 1 – питающая сеть; 2 – управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме; 3 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 4, 6 – повышающий и понижающий силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты мощностью 2,5 кВА каждый; 5 – высоковольтная кабельная линия повышенной частоты (кабель РК-75, 30 м), 7 – теплоизолированная ёмкость к теплоносителем, 8 – нагрузка: три электронагревателя мощностью ~1 кВт (220 В) каждый

Результаты проведенных экспериментов и расчетов приведены в табл. 4.3 (рис. 3.18а) и табл. 4.4 (рис. 3.18б). Анализ этих сведений позволяет сделать вывод о хорошем согласовании расчетных и экспериментальных значений. Случаи расхождения результатов расчета и эксперимента (табл. 4.3 и табл. 4.4) на величину, превышающую оцененную выше погрешность, можно объяснить отмеченной в ходе экспериментов некоторой неоднородностью нагрева
теплоносителя (воды). Это, несмотря на удобство и эффективность использованной экспериментальной методики определения КПД, обусловливает необходимость ее дальнейшего совершенствования и уточнения. Например, таким усовершенствованием может быть применение более эффективного перемешивания воды для получения однородного распределения температуры по ее объему.

Вид и тип транзисторов	Нагрузка (количество подключенных нагревателей)	<i>f</i> , кГц	I=, A	U=, B	Р=, кВт	η, % опыт	η, % расчет		
Полевой транзистор FQA11N90C	1/3 нагр.	1117	2	229	0,46	97,35	98,52		
	1/2 нагр.	11	3	201	0,61	97,58			
	1/2 нагр.	13	3	201	0,61	97,59	97,78		
	1/2 нагр.	15	3	201	0,61	97,51			
	1/2 нагр.	17	3	201	0,61	97,22			
	1 нагр.	1117	4	270	1,08	93	96,65		
IGBT-транзистор IRG4PSH71UDPBF	1 нагр.	5	4,065	259	1,08	98,82	99,84		
		11	4,065	245	1,01	98,96			
		13	4,065	244	0,99	99,2			
		17	4,065	237	0,96	96,61			
	2 нагр.	5	8,5	237	2,01	98,93	99,68		
		11	8,5	228	1,94	99,9			
		13,7	8,5	226	1,92	98,31			
		17	8,5	222	1,89	98,52			
	3 нагр.	5	13,63	247	3,36	98,53	99,52		
		11	14,7	244	3,47	98,17			
		13	14,58	245	3,58	99,9			
		17	14,24	241	3,42	95,95			

Таблица 4.3 Результаты экспериментального и расчетного определения КПД полупроводникового преобразователя напряжения (рис. 4.18a)

Сведения, представленные в табл. 4.3, позволяют сделать вывод о, по крайней мере, слабом влиянии на величину КПД преобразователя напряжения таких параметров, как частота рабочего напряжения и величина передаваемой мощности в исследованном диапазоне их изменения. Существенным фактором, оказывающим влияние на КПД, является тип и параметры применяемых транзисторов. Обращает на себя внимание высокое значение КПД преобразователя, выполненного с использованием современных высоковольтных IGBT транзисторов (табл. 4.3).

В случае применения ЭТКПЧ, представленного на рис. 3.186, КПД установки согласно табл. 4.3 и табл. 4.4 имеет меньшую величину, чем при использовании одиночного преобразователя (рис. 3.18а), из-за наличия потерь энергии в силовых трансформаторах и кабельной линии. Однако это снижение невелико, что объясняется высоким значением КПД силовых трансформаторов повышенной частоты (не менее 99,5%, глава 3.1.2, [111]), и не может рассматриваться, как серьезный фактор, препятствующий широкому применению ЭТКПЧ.

Вид и тип	Режим	Нагрузка	<i>f</i> ,	Длина	I=, A	U=,	P=,	η, %	η, %
транзисторов	работы	Пагрузка	кГц	кабеля, м		В	кВт	опыт	расчет
IGBT-транзистор IRG4PSH71UDPBF	Электропередача с кабелем РК-50	1 нагр.	13	12	4,32	255	1,14	97,96	97,58
		2 нагр.	13	12	8,62	249	2,14	99,29	97,93
		3 нагр.	13	12	12,68	235	2,98	99,23	97,65
		1 нагр.	13	27	4,33	240	1,05	97,2	97,36
		2 нагр.	13	27	8,71	239	2,07	99,37	97,71
		3 нагр.	13	27	12,63	239	3,02	96,6	97,4
		1 нагр.	13	39	4,25	235	0,99	98,7	96,9
		2 нагр.	13	39	8,5	235	2,00	99,3	97,45
		3 нагр.	13	39	12,63	228	2,94	96,6	97,16
		2 нагр.	17	27	8,8	231	2,04	97,4	97,85
		3 нагр.	17	27	12,63	228	2,88	95,6	97,49
	Электропе- редача с кабелем РК-75	1 нагр.	13	30	4,25	263	1,12	99,2	97,49
		2 нагр.	13	30	8,42	246	2,07	98,97	97,77
		3 нагр.	13	30	12,63	241	3,04	95,9	97,43

Таблица 4.4 Результаты экспериментального и расчетного определения КПД ЭТКПЧ (рис. 4.186)

Как и в случае одиночного преобразователя (рис. 4.18а), в установке с электропередачей (рис. 4.18б) наблюдается слабое влияние величины передаваемой мощности на ее КПД, что можно заключить из анализа сведений табл. 4.3 и рис. 4.4. Лишь при значении мощности, составляющей менее 25% согласно результатам расчета (рис. 4.16), наблюдается заметное снижение КПД, которое согласуется с данными [108, 117] и объясняется увеличением реактивной мощности в кабельной высоковольтной линии по мере снижения нагрузки и соответствующим

увеличением доли потерь, обусловленной токами этой мощности. Такое влияние передаваемой мощности на КПД электропередачи необходимо учитывать при выборе ее рациональных конструкции и режимов работы.



Рис. 4.16. Зависимость КПД ЭТКПЧ (рис. 3.18б) от величины передаваемой мощности при длине 27 м кабеля РК-50 и частоте рабочего напряжения f = 13200 Гц: линия — расчет по формуле (4.9), точки — эксперимент (табл. 4.4)

Длина кабеля электропередачи повышенной частоты (рис. 3.186) в исследованном диапазоне значений этого параметра (табл. 4.4) оказывает достаточно слабое влияние на величину КПД электропередачи, что иллюстрируется рис. 4.17.



Рис. 4.17. Зависимости КПД ЭТКПЧ (рис. 3.18б) от длины кабельной линии РК-50 при различной нагрузке: 1 нагреватель – сплошная линия, точки – треугольник; 2 нагревателя – штрих-пунктирная линия, точки – квадрат; 3 нагревателя – пунктирная линия, точки – треугольник; линии – расчет по формуле (4.9), точки – эксперимент

Объяснение этому дают результаты расчетной оценки характерной структуры потерь в ЭТКПЧ (рис. 3.18б), представленные на рис. 4.18.



Рис. 4.18. Структура потерь в ЭТКПЧ (рис. 3.18б) при различной нагрузке (кабель РК-75 длиной 30 м): а – нагрузка – 1 нагреватель ( $P_H = 1$ кВт); б – 3 нагревателя ( $P_H = 3$  кВт); T<sub>1</sub> – трансформатор на входе в кабельную линию (поз. 6, рис. 3.18б); T<sub>2</sub> – трансформатор на выходе кабельной линии (поз. 7, рис. 3.18б)

Кабельной линии принадлежит небольшая и наименьшая доля потерь энергии в ЭТКПЧ при любой нагрузке. Поэтому, хотя с увеличением передаваемой мощности эта доля возрастает (рис. 4.18), рост потерь в линии не может оказать сильного влияния на величину КПД всего ЭТКПЧ. Сведения рис. 4.18 позволяют сделать также важный вывод, что, несмотря на высокое значение КПД силовых трансформаторов, отмеченное выше, на них приходится основная доля потерь – не ниже 68%. Это означает, что в дальнейших научнотехнических разработках по рассматриваемой теме значительные усилия необходимо посвятить оптимизации конструкции и улучшению характеристик силовых трансформаторов повышенной частоты. Анализ производственных условий возможного практического применения ЭТКПЧ показывает, ЧТО максимальная длина высоковольтного кабеля, как правило, не будет превышать 50-60 м. В этом случае согласно рис. 4.17 КПД ЭТКПЧ будет иметь величину не ниже 96,6-97% (т.е. доля потерь энергии не превысит 3-3,4 % передаваемой мощности) при наличии возможности дальнейшего улучшения этих показателей посредством оптимизации конструкции и режимов работы подобных установок.

Такие значения КПД ЭТКПЧ сопоставимы со значениями КПД распределительных сетей промышленной частоты.

Приведенные результаты расчета и эксперимента (табл. 4.4, рис. 4.16 и 4.17) хорошо коррелируются со сведениями, имеющимися в мировом информационном пространстве. Например, производители устройств частотного электропривода, которые в настоящее время изготавливаются с использованием мощных IGBT транзисторов, имеют частоту модуляции около 15 кГц (близкое к значению этого параметра в настоящей работе) и мощность от 0,5 кВт до 260 кВт и более, гарантируют КПД их установок имеют величину не менее 98%. Это является подтверждением достоверности полученных в работе и приведенных выше результатов исследования показателей энергетической эффективности.

Важным аспектом практического применения рассматриваемых локальных ЭТКПЧ организации централизованного для электропитания электротехнологических установок, использующих напряжения И токи повышенной электротепловой обработки частоты, например, установок железобетонных изделий, является оценка технико-экономических ИХ показателей. Однако подробный технико-экономический (сроки анализ дисконтированный доход, рентабельность, окупаемости, чистый И т.п.) применения ЭТКПЧ требует знания конкретных производственных условий, представляет собой достаточно сложное и трудоемкое мероприятие и является, темой отдельного Тем по-видимому, научного исследования. не менее, технико-экономической эффективности предварительную оценку рассматриваемой системы электропитания (рис. 1.10 и 1.11) можно выполнить посредством сравнения двух упрощенных альтернативных вариантов. Результаты такого сравнения представлены в Приложении Г и свидетельствуют о высокой технико-экономической эффективности ЭТКПЧ.

Кроме этого, необходимо учитывать, что применение ЭТКПЧ является в настоящее время, например, практически единственно возможным способом организации электропитания технологических установок ЭТО железобетонных изделий токами повышенной частоты на предприятиях строительной отрасли. Такая обработка по своим технико-экономическим показателям значительно превосходит традиционные технологические процессы, ее развитие и широкое применение рассматривается, как одно из наиболее перспективных направлений научно-технического прогресса [25–29, 122, 135, 140, 142, 144].

#### 4.5. Выводы по главе 4

1. Предложенная методика выбора рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты (глава 2) демонстрирует значительное влияние таких эксплуатационных факторов как протяженность линии, частота рабочего напряжения и заданная надежность. Эти факторы не учитываются в существующих методах выбора изоляции, что делает их малопригодными при конструировании ЭТКПЧ, а предложенная методика является эффективным инструментом решения подобных вопросов.

2. Предложенная методика (глава 2) численно-аналитического расчета установившегося электротеплового режима высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ получила косвенное подтверждение достоверности в ходе экспериментов, выполненных в производственных условиях.

3. Результаты оценок с помощью предложенной численно-аналитической методики установившегося электротеплового расчета значений максимального допустимого рабочего тока кабельной линии и допустимого напряжения на изоляции по условиям теплового режима демонстрируют существенные отличия от результатов, полученных с помощью традиционных методов. Этот вывод делает предложенную методику необходимым и обязательным элементом применения в математической модели ЭТКПЧ.

4. Результаты экспериментов, выполненных в производственных условиях, служат дополнительным подтверждением достоверности расчетных методов,

предложенных в настоящей работе и наглядно демонстрируют техническую возможность и целесообразность применения локальных ЭТКПЧ для создания централизованных систем промышленного электропитания объектов, использующих напряжение повышенной частоты. Одновременно не было выявлено каких-либо недостатков, фактов или обстоятельств, вызывающих сомнение в возможности и необходимости применения таких устройств на практике.

5. Выполненные эксперименты и согласующиеся с ними результаты расчетных оценок демонстрируют, что ЭТКПЧ по величине потерь электроэнергии и показателями энергетической эффективности не уступают системам на основе напряжения промышленной частоты (Приложение Г).

6. Применение частотного анализа электрических цепей на основе разложения Фурье позволяет получить достаточно простую процедуру расчетного определения показателей энергетической эффективности (величина потерь электроэнергии, КПД) ЭТКПЧ, предназначенных для локальных систем электропитания промышленного оборудования повышенной частоты.

7. Оценка технико-экономических показателей ЭТКПЧ, предназначенных для решения задач промышленного электроснабжения, должна базироваться на сравнении таких устройств с установками традиционного исполнения (промышленной частоты 50 Гц) как по абсолютным показателям, так и по удельным.

8. Сравнение технико-экономических показателей ЭТКПЧ также демонстрирует многократное преимущество над установками промышленной частоты. Удельная масса силовых трансформаторов, например, снижается в 50 раз, их габариты – 20 раз, удельная стоимость – в 4–5 раз (см. Приложение Г).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

188

1. Исследования, выполненные в настоящей работе, демонстрируют целесообразность применения метода частотного анализа с использованием разложения несинусоидальных токов и напряжений в ряд Фурье для выполнения теоретических исследований установившихся электрических процессов в ЭТКПЧ. При использовании разложения в ряд Фурье в процессе расчета ЭТКПЧ необходимо учитывать:

– форму осциллограммы воздействующего напряжения (ЭДС)
 полупроводникового преобразователя на элементы ЭТКПЧ;

 изменение активного сопротивления обмоток силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты и сопротивления токоведущих частей силового кабеля вследствие скин-эффекта;

– потери электроэнергии в магнитопроводе силовых трансформаторов;

– зависимость внутреннего сопротивления транзисторов
 полупроводникового преобразователя напряжения в открытом состоянии от
 частоты протекающего через него переменного электрического тока;

– линейный характер элементов электрических цепей (кроме упомянутых выше), входящих в состав ЭТКПЧ.

Исследования показали, что предельное значение учитываемых гармоник при использовании предложенной методики определяется необходимостью устранения эффекта Гиббса и должно составлять не менее *N* = 3000.

2. Рабочее напряжение высоковольтных кабельных электропередач в составе ЭТКПЧ целесообразно выбирать максимально возможным для обеспечения максимальной передаваемой мощности.

Разработанная методика выбора величины рабочего напряжения позволяет обоснованно решать эту задачу с учетом влияния важнейших факторов:

требуемого срока службы изоляции кабельной линии  $\tau = \tau_{CЛ}$ ;

– эксплуатационной надежности Р;

– длины кабельной линии *l*;

– экспериментальных сведений об электрической прочности и параметрах старения изоляции, применяемой в таких кабельных линиях.

Отмечено существенное влияние этих факторов на конечный результат: величина максимального рабочего напряжения линии в 10–20 раз ниже величины кратковременного пробивного напряжения кабельной изоляции.

3. Разработана оригинальная методика численно-аналитического расчета установившегося электротеплового высоковольтной кабельной режима электропередачи в составе ЭТКПЧ, являющаяся универсальным, удобным, простым инструментом исследования установившихся температурных режимов кабельных линий и выбора предельных токовых нагрузок. Методика позволяет учесть в расчетах нелинейное изменение электрофизических и теплофизических показателей материалов при простой программно-алгоритмической реализации в среде Matlab. Результаты оценок значений максимального допустимого рабочего тока кабельной линии и допустимого напряжения на изоляции по условиям предложенной теплового режима, полученных с помощью методики, демонстрируют существенные отличия от результатов, полученных с помощью традиционных методов, что делает предложенную методику необходимым и обязательным элементом математической модели ЭТКПЧ.

4. Применение энергетического подхода для расчета емкостных И индуктивных параметров обмоток силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты является удобным способом оценки этих показателей и эффективной альтернативой численному расчету электрического поля изоляционной конструкции трансформатора в трехмерном пространстве, в случаях, представляющих практических интерес и не имеющих готовых решений в литературных источниках. При разработке методики расчета основных конструктивных параметров трансформатора (выбор магнитопровода, конструктивного выполнения обмоток) учтено влияние поверхностного эффекта и эффекта близости в отличие от существующих подобных методик расчета, введена процедура вычисления активного сопротивления, отражающего потери в магнитопроводе трансформатора. Рассмотренная методика расчета значений активных, ёмкостных и индуктивных элементов является основой для определения параметров традиционной Т-образной схемы замещения трансформаторов повышенной частоты при выполнении электрического расчета ЭТКПЧ.

5. Применение метода частотного анализа для электрических цепей на основе Фурье позволяет получить простую разложения процедуру расчетного определения показателей энергетической эффективности ЭТКПЧ (величина потерь электроэнергии, КПД). Предварительное сравнение эффективности ЭТКПЧ с системами 50 Гц на обобщенных примерах показывает, что стоимость передачи мощности потребителям с помощью ЭТКПЧ снижается в 3-5 раз, относительно установок промышленной частоты, КПД комплексов сравним. силовые трансформаторы повышенной частоты Высоковольтные ПО значительно превосходят трансформаторы рассмотренным показателям промышленной частоты, что обеспечивает предпосылки к их применению в составе ЭТКПЧ: удельная масса трансформаторов снижается в 50 раз, их габариты – в 20 раз, удельная стоимость – в 4-5 раз. Приведенная методика экспериментального определения показателей энергетической эффективности таких трансформаторов в опытах XX и КЗ, а также ЭТКПЧ в рабочих режимах способом себя удобным неэлектрическим показывает И эффективным инструментом, сочетающий преимущества калориметрического метода и метода измерения мощности на СВЧ. Однако получения для точных оценок эффективности ЭТКПЧ требуется продолжение исследований применительно к производственным условиям конкретных промышленных предприятий.

6. Экспериментальные результаты, полученные на лабораторных моделях ЭТКПЧ в различных режимах работы (под нагрузкой, режим XX и K3), полностью подтверждают достоверность расчетной методики установившихся электрических режимов, основанной на применении частотного анализа, а также других предложенных в работе расчетных методик (глава 2). Результаты экспериментальных исследований лабораторного ЭТКПЧ (глава 3) полностью подтвердили основные отличительные особенности предложенной методики электрического расчета установившихся режимов на основе частотного анализа (влияние частоты гармоник на величину активных сопротивлений схемы замещения и на величину внутреннего сопротивления преобразователя, учет реальной формы осциллограммы ЭДС источника). Результаты экспериментов, выполненных в производственных условиях (глава 4), служат дополнительным подтверждением достоверности расчетных методов, предложенных в настоящей работе, и наглядно демонстрируют техническую возможность и целесообразность применения локальных ЭТКПЧ для создания систем централизованного промышленного электропитания объектов ЭТО. Вместе с тем вполне вероятно, потребуется дальнейшее развитие, совершенствование и что уточнение предложенных расчетных методик в случае применения на практике более сложных ЭТКПЧ.

Автор выражает благодарность старшим коллегам: Алексею Васильевичу Гусенкову и Владимиру Дмитриевичу Лебедеву, за консультации и совместные обсуждения наиболее важных вопросов при работе над диссертацией.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники / Ю.К. Розанов – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И.
 Мелешин – М: Техносфера, 2005. – 632 с.

3. Ситников, В.Ф. Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока/ В.Ф. Ситников // Электричество – 2008. – №2. – С. 33–38.

4. Ситников В.Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе элементов гибких электропередач (FACTS): дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / Ситников Владимир Федорович. – Иваново, 2009. – 304 с.

P.P. выбора 5. Исмагилов, Методика параметров системы полупроводниковый преобразователь-ферромагнитный умножитель частоты / Р.Р. И.М. Гарифуллин, M.C. Камалов // Исмагилов, Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа. - 2010 - C. 189–194.

6. Рогинская, Л.Э. Ферромагнитный учетверитель частоты / Л.Э. Рогинская, Р.Р. Исмагилов //Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа. – 2010 – С. 290–294.

7. Липатов, В.С. Тиристорные формирователи импульсов напряжения для управления высоковольтными коммутирующими электронными приборами / В.С. Липатов // Электротехника. № 5. – 2014. — С. 2–8.

8. Юлегин, А.Н. Предел мощности параллельного инвертора на высокой частоте/ А.Н. Юлегин //Электричество. № 12. – 2014. — С. 23–36.

9. Суяков, С.А. Алгоритмы управления трехфазным автономным инвертором напряжения с применением современной аналоговой элементной базы / С.А. Суяков, С.А. Голубев, А.И. Чивенков // Актуальные проблемы

электроэнергетики: Труды Нижегородского государственного технического университета. 2009. - том 77 - С. 26- 31.

10. Шрайбер, Д. Силовые преобразовательные устройства. Базовые схемы и классификация / Д. Шрайбер / Компоненты и технол. № 12. – 2009. — С. 106-112.

11. Липатов, В.С. Оптимальное управление стационарными режимами высоковольтных электроннолучевых вентилей/ В.С. Липатов, А.Н. Бережнов //Электротехника. № 4. – 2013. — С. 18–26.

Ланцов, В. Электронная компонентная база силовых устройств. Ч. 3. / В.
 Ланцов, С. Эраносяп // Силовая электроника. № 2. – 2010. – С. 8–14.

Pemen, Liu Z., Current multiplication by using multiple thyristors. / L. Z.
 Pemen, E. J. M. van Heesch, G. J. J. Vinands // Sci. Instrum. №2. – 2008. – P.79

14. Патент 2417509 Российская Федерация. МПК Н02М 5/10, Н02М 7/04. Преобразователь частоты / О. В. Григораш, А. В. Винников., В. В. Алмазов, Н. Н. Кирьян, А. О. Григораш; заявитель и патентообладатель – КубГАУ – №2010105579/07; заявление 16.02.2010; опубликовано 27.04.2011.

15. Кондаков, Л.А. Матричные преобразователи частоты, / Л.А. Кондаков,
А.А. Щукин //Информатизация и Системы Управления в Промышленности. –№ 1.
– 2013. – С. 15-16

16. Васин, И.М. Способ формирования высокого напряжения матричного каскадного преобразователя частоты / И.М. Васин, С.В. Махонин, Б.А. Скворцов //Электричество. № 9. – 2012. — С. 51–55.

17. Федосов, С.В. Принципы организации современной электроэнергетики /
С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Ю.Н. Бочаров, А.М. Соколов //
Энергетик. №3. – 2014. – С. 46–49.

Федосов, С.В., Соколов А.М. Принципы организации современной электроэнергетики, продолжение / С.В. Федосов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Ю.Н. Бочаров, А.М. Соколов // Энергетик. №4. – 2014. – С.15–18.

19. Rodrigues, J. P. Three-level zero-voltage switching pulse-width modulation DC - DC boost converter with active clamping/ J. P Rodrigues, S. A. Mussa, A. J. Barbi Perin // IET Power Electronics. No 3. – 2010. — P. 345–354.

Розанов, Ю.К. Многофункциональный регулятор качества
 электроэнергии на основе силового электронного преобразователя/ Ю.К. Розанов,
 М.Г. Лепанов, М.Г. Киселев // Электротехника. № 8. – 2014. – С. 51–59.

Чивенков, А.И. Тиристорный регулятор напряжения трансформаторов 6 кВ / А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, А.В. Нажимов, А.А. Асабин, М.С. Солдатова // Промышленная энергетика. №8. – 2010. — С. 30–33.

22. Чивенков, А.И. Снижение токовых коммутационных перегрузок в трансформаторно-тиристорных регуляторах переменного напряжения / А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, А.В. Нажимов, М.С. Солдатова // Промышленная энергетика – 2010. – №9. – С. 38–41.

23. Щербаков, А.В. Высоковольтный источник знакопеременного питания со следящей системой управления/ А.В. Щербаков // Электротехника. № 9. – 2013.
 – С. 2–9.

24. Bai, Ya-xiang, Hi Yu-cai, Yang Gui-juan, Tang Delong. Gaodianya Jishu Experimental study of drying fish in the high-voltage electric fields / Bai Ya-xiang, Hi Yu-cai, Yang Gui-juan, Tang Delong. Gaodianya Jishu //High Voltage Eng. № 4. – 2008. – P. 691–694.

25. Федосов, С.В. Электротепловая обработка бетона токами различной частоты / С.В Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов, Г.Н. Закинчак // Строительные материалы. № 6. – 2010. – С. 4–7.

26. А.М. Соколов Научные основы процессов электротепловой обработки композиционных материалов в производстве конструкционного бетона: дис. ... дра техн. наук: 05.02.13 / Соколов Александр Михайлович. – Иваново, 2012. – 391 с.

27. Баженов, О.А. Разработка высоковольтного оборудования и технологии электротепловой обработки изделий токами ультразвуковой частоты / О.А. Баженов, В.И. Бобылёв, Ю.А. Митькин, М.Е. Тихов, А.М. Соколов, Д.В. Семёнов // Сборник трудов второй международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» Санкт-Петербург – 2006

28. Федосов, С.В. Исследование суточной прочности бетона при электротепловой обработке бетона токами различной частоты/ С.В. Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов // Строительные материалы. № 3. – 2010. – С. 52–54.

29. Федосов, С.В. Исследование параметров электротепловой обработки бетона токами различной частоты/ С.В. Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов // Строительные материалы. № 5. – 2009. – С. 51–53.

30. Титов, М.М. Технология предварительного электроразогрева бетонной смеси с использованием современного оборудования / М.М. Титов // Известия вузов. Строительство. №2. – 2009. – С. 56–62.

31. Синютин, Е.В. Оптимизация процесса сушки хвойной древесины в высокочастотном электрическом поле/ Е. В. Синютин, В. В. Кашмеги, А. В. Марков // Деревообрабатывающая промышленность. № 5. – 2008. – С. 26–28.

32. Розанов, Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники/ Ю.К. Розанов // Электричество. –№7. – 2005.– С. 52–63.

З3. Вдовин, С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.:
 Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.

34. Способ определения потерь в магнитопроводах трансформаторов малой мощности на звуковых частотах Н. В. Левицка, А. И. Звенигородска МПК: G01R 33/12 Опубликовано: 01.01.1972.

35. Билько, М.И. Измерение мощности на СВЧ / М.И Билько, Томашевский А.К., Шаров П.П.– М.: Сов. Радио, 1976 –168 с.

36. Преимущества кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена // Энергоinfo. №10. – 2008. – С. 57.

37. Емельянов, Н.И. О применении кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / Н.И. Емельянов, Л.И. Сарин, А.Ю. Хлопова // Проблемы. Транспорта Сибири и Дальнего востока. №1. – 2008 – С. 114–116.

38. Кабели с изоляцией из СПЭ российского производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elec.ru/articles/kabeli\_spe/

39. Detlef, W. Evolution of medium voltage cable technology in Europe/ W Detlef, A. Smedberg // IEEE Electrical Insulation Magazine. №5. – 2008. – P. 31–35.

40. Changes at the top for Europe's cable industry. Plast. Eng. №1. – 2006. – P.36

41. Boxie, D. The state of development in the field of power cables /Du Boxie, Ma Zongle, Hio Zhenxing, Wang Li, Li Huachun. Gaoya dianqi //High Voltage Apparates.  $N_{2}$  7. – 2010. – P. 100–104.

42. Xin, S. Trends in the development of production and supply of materials for the manufacture of electrical cables in China / Sun Xin, Zhang Jianyao, Gui Wenwu, Suliao Hast // Science and Technology.  $N_{2}$  1. – 2009. – P. 84–86.

43. Pelissou, S. A review of possible methods for defining tree retardant Crosslinked polyethylene (TRXLPE)/ Pelissou, Serge, Harp Richie. Bristol Ray, Densley John, Fletcher Chris, Katz Carlos. Kuchta FYank, Kung Dominic, Person Tim, Smalley Tim, Smith John T / IEEE Electrical Insulation Magazine.  $N_{0}$  5. – 2008. – P. 22–30.

44. Xiaoquan, Z. Propagation mechanism of electrical tree in XLPE cable insulation by investigating a double electrical tree structure / Zheng Xiaoquan, Chen George // IEEE Trans. Dielec, and Elec. Insul.  $N_{2}$  3 – 2008. – P. 800–807.

45. Florin, C. Chemical crosslinking or polyethylene and its effect on water tree initiation and propagation / Ciupnna Florin, Teissedre Gisele, Filippini Jean Cesar, Smedberg Annika, Campus Alfred, Hampton Nigel. // IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.  $N_{2}$  3. – 2010. – P. 709–715.

46. Ковригин, Л.А. Моделирование частичных разрядов в изоляции кабелей среднего напряжения/ Л.А. Ковригин // Электротехника. № 11. – 2013. – С. 49–51.

47. Коржов, А.В. Влияние режима работы силовых кабелей 6(10) кВ на параметры частичных разрядов в изоляции / А.В. Коржов //Электротехника. № 10. – 2013. – С. 55–59.

48. Новые материалы для производства кабелей высокого напряжения / Кри
С. Х., Гессене Т., Кьелкенст Е. Б., Мендельсон А., Гау И. // Кабели и провода.
№ 1. – 2009. — С. 26–30.

49. Пугачёв, А.А. Оценка технического состояния кабелей / А.А. Пугачёв // Электрооборудование: эксплуатация и монтаж. №7. – 2009. – С. 49–51.

50. Блеклов, Д.В. Причины выхода из строя концевых и соединительных муфт кабелей среднего напряжения / Д.В. Блеклов, С.С. Ветлугаев, Ю.В. Образцов, П.В. Фурсов // Энергетик. №5. – 2014. – С. 53–55.

51. Маслов, В.А. Электроизоляционные материалы высокой нагревостойкости / В.А. Маслов // Электротехника. № 7. – 2014. – С. 44–48.

52. Cable and article design for fire performance Пат 7304245 США. МПК H 01 В 7/00 (2006.01) Ceram Polymerik Pry Ltd. Alexander Graeme, Cheng Yi-Bing, Burford Robert Paul. Mansouri Jalch, Wood Christopher. Barber Kenneth Willis, Rodrigo Pulahinge Don Dayananda. Ivanov Ivan Д. 10/.4516(i2: Заявл 31.03.2004: Опубл. 04.12 2007 Приор 31.03.2003. № 2003901872 (Австралии); НПК 174/110 R.

53. Состав негорючий кабельный Пат. 2382427 Россия, МПК Н 01 В 3/00 (2006.01) Н о В 7/295 (2006.01). СЕВАН Электротехнич. корп. Энергокомплекс, Курашов Д. А., Панов И. В., Барсуков В К. Знаменская Л. В. Барсуков Е. В. Денисова О. В № 2008Ц5288/09; Заявл. 17.11.2008; Опубл. 20.02.2010.

54. Stan, S. Cable designed to function electrically during emergencies / Stephan Stan // Rubeer World. No2. - 2010 - P. 29-31.

55. Мокански, В. Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем // Кабели и провода. №2. – 2009. – С. 14–17.

56. Высоцкий, В.В. Сверхпроводимость 100 лет спустя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vniikp.ru/cable2.phtml?item\_id=2644

57. Высоцкий, В.С. Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия / В.С. Высоцкий // Электричество. № 11. – 2014. – С. 4–16.

58. Первый российский сверхпроводящий силовой кабель на основе ВТСП успешно прошел испытания, Сверхпроводники для электроэнергетики – 2009 – №3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://perst.isssph.kiae.ru/supercond/bulletein.php?menu=bull\_subj&id=589

59. Sytnikov, V.E. The 5 m HTS Power Cable Development and Test/ V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, A.V. Rychagov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. №17 – 2007. – P. 1684.

60. Sytnikov, V.E. 30 m HTS Power Cable Development and Witness / V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, A.V. Rychagov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. №19. – 2009. – P. 1702.

61. Sytnikov, V.E. The 30 m HTS power cable development and test / V.E. Sytnikov, V.S. Vysotsky, A.V. Rychagov // Gyeongnam: KIASC – 2009 – P. 907.

62. Sytnikov, V.E. The AC loss analysis in the 5 m HTS power cables/ V.E. Sytnikov, K.A. Shutov, V.S. Vysotsky // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. №19 – 2009. – P.1706.

63. Kopylov, S.I. HTS DC Cable Line Project: On-Going Activities in Russia/ S. I. Kopylov V.E. Sytnikov, S.E. Bemert, Y.V. Ivanov, I.V. Krivetskiy, D.A. Rimorov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. №3 – 2013. – P.5401904

64. Kopylov, S.I. Comparative Analysis of Various Superconducting and Non-Superconducting Fault Current Limiting Devices Designed for Operation in a 110 kV/100 MW Power Network/ S.I. Kopylov, V.A. Altov, N.N. Balashov, S.S. Ivanov, V.V. Zheltov, V.D. Zemerikin // Elsevier Physics Procedia – 2012. – P. 1268–1271

65. Копылов, С.И. К вопросу создания сверхпроводникового токоограничителя трансформаторного типа / С.И. Копылов, Е.Ю. Каменева, М.В. Попова // Вестник РГАЗУ. №11. – 2012. – С.110–113.

66. Копылов, С.И. Будущие передачи электроэнергии по интеллектуальным сетям: сверхпроводящие линии постоянного тока / С.И. Копылов, А.Ю. Коваленко, Д.С. Риморов, В.Е. Сытников, О.В. Фролов, Ю.Г. Шакарян // ФПС'11, Сборник расширенных тезисов, Москва, ФИАН – 2011. – С. 289–290.

67. Копылов, С.И. ВТСП передача постоянного тока как элемент «интеллектуальной сети» крупных городов / С.И. Копылов, В.Е. Сытников, Ю.Г. Шакарян, И.В. Кривецкий// Материалы 1-й национальной конференции по прикладной сверхпроводимости НКПС – 2011.– С. 294–298.

68. Копылов, С.И. Экспериментальный стенд для исследования теплофизических электрофизических свойств высокотемпературных сверхпроводников/ В.Д. Жемерикин, C.C. Иванов, Я.А. Королёв Сверхпроводимость: исследования и разработки. №16. – 2013. – С.109–113.

69. Setoguchi, O. Design and evaluation of 66 kV class HTS power cable using REBCO wires / Ohya M.y Setoguchi T.y Yumura H., Masuda T., Amemiya N., Murayama 0., Ohkuma T.// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. №21 – 2011. – P.1009–1012.

70. ГОСТ 11326.0-78 Кабели радиочастотные. Общие технические условия.

71. Кабель КВСП-М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cable.ru/cable/marka-kvsp\_m.php

72. Леонов, В.М. Основы кабельной техники / В.М. Леонов, И.Б. Пешков,
И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр
«Академия» – 2006. – 432 с.

73. Койков, С.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков / С.Н. Койков, А.Н. Цикин – Л.: Энергия – 1968. – 186 с.

74. ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.

75. ГОСТ 23366-78 Ряды номинальных напряжений постоянного и переменного тока.

76. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

77. Типовые технические требования к кабельным системам 110, 220, 330, 500 кВ стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», СТО 56947007-29.230.20.087-2011.

Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10,
 20, 35 кВ. Ассоциация "Электрокабель", ОАО «ВНИИКП» – 2004. – 51 с.

79. ГОСТ 2990-78 Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением.

80. ГОСТ 31996-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ.

81. ГОСТ 31565-2012 «Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности» и др. предоставляющие всю необходимую информацию по методам прокладки кабелей, испытания и требований к эксплуатации кабелей.

82. ГОСТ 12.2.007.0-75 ССБТ Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (с Изменениями № 1, 2, 3, 4).

83. ГОСТ 12.2.007.14-75 ССБТ Кабели и кабельная арматура. Требования безопасности.

84. ГОСТ 18690-82 Кабели, провода, шнуры и кабельная арматура. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение.

85. ГОСТ Р 53315-2009 Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности.

86. ГОСТ Р 53769-2010 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия».

87. МЭК 60183:1984 Кабели высоковольтные. Руководство по выбору.

88. МЭК 60840:2004 Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ и до 150 кВ. Методы испытаний и требования к ним.

89. МЭК 62067:2001 Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ (Um =170 кВ) и до 500 кВ (Um = 550 кВ). Методы испытаний и требования к ним.

90. Инструкция по прокладке кабелей силовых с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20 и 35 кВ. RUKAB/ID 23-2-019. ЗАО «АББ– Москабель».

91. Прокладка силовых кабелей на напряжение 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. ИМ СК-20-03. ООО «Камкабель». Инструкция.

92. Гудков, В.В. Особенности методик и средств испытаний кабелей с СПЭ-изоляцией / В.В. Гудков //Энергобезопасность и энергосбережение. №6. – 2009. – С.4–6.

93. Путтер, Х.Т. Эволюция метода испытания напряжением сверхнизкой частоты за последние два десятилетия / Х.Т. Путтер, Д. Гетц, Ф. Петцольд, Х. Оетджен, М. Захаров // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rusmegger.ru/articles/vlf%20evolution.pdf

94. Hamon, B.V. An approximate method for deducing dielectric loss factor from direct-current measurements/ B.V. Hamon // Proc. IEEE – vol.99 –P. 151–155.

95. Jäverberg, N. Applied Voltage Frequency Dependence of Partial Discharges in Electrical Trees / N. Jäverberg, H. Edin// Proc. IR-EE-ETK, Stockholm, Sweden, – 2009.

96. Neudert, E. Characterization of tree processes in XLPE by PD Measurement at 50 Hz and very low frequencies / E. Neudert, M. Sturm // ICDI Budapest – 1997.

97. Moh, S.H. Very low frequency testing effectiveness in detecting hidden defects in cables / S.H. Moh // 17th international conference on electricity distribution, CIRED, Barcelona – 2003.

98. Установки для испытания кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mirmsk.ru/ustanovki-dlya-ispytaniya-kabelya-s1.

99. Very Low Frequency AC Hipots [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hvinc.com/vlf.html#

100. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.060.20.071 – 2011.

101. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. ГОСТ Р МЭК 60287-2009 – 2009

102. Anders, G.J. Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, / Geoge J. Anders //Distribution and Industrial Applications. — McGraw Hill Professional – 1997 – 428 p.

103. Титков, В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ кабеля /В.В. Титков // КАБЕЛЬпеws. №10 – 2009. – С. 47–51.

104. Курнышев, Б.С. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин // Монография. Иваново – 2005. – 100 с.

105. Ермилов, А.А. Электроснабжение промышленных предприятий / А.А. Ермилов, Б.А Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –144 с.

106. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

107. Файбисович, Д.Л. Укрупнённые стоимостные показатели электрических сетей 35–1150 кВ / Д.Л Файбисович, И.Г. Карапетян – М.: НТФ "Энергопрогресс", 2003. – 32 с.

108. Гусенков, А.В. О возможности и целесообразности физического моделирования электропередач с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // Энергетик. №4. – 2015. – С.29–32.

109. Гусенков, А.В. Перспективы создания высоковольтных систем электроснабжения промышленных предприятий на основе полупроводниковых преобразователей напряжения. / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2013. – С. 112–114.

110. Шадриков, Т.Е., Методика оценки технико-экономических показателей высоковольтных силовых трансформаторов непромышленной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Материалы XI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2014» Т. 3 ч.2 – Иваново: ИГЭУ. – 2014 – С. 206.

111. Шадриков, Т.Е Технико-экономические показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем

переменного тока повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев // Энергетик – 2015 – №2. – С.11–14.

112. Башарин, С.А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля: Учебное пособие / С.А. Башарин,
В.В. Федоров. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 304 с.

113. Осипов, Ю.М. Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей. Учебное пособие / Ю.М. Осипов. – СПб: СПбГИТМО, 2002 – 99 с.

114. Александров, Г.Н. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения/ Г.Н. Александров, А.В. Горелов, В.В. Ершевич и др.; Под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 530 с.

115. Дьяков, А.Ф. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. Т.1 Электропередачи переменного тока / под общей редакцией чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК» – 2012. – 696 с.

116. Гуртов, В.А. Твердотельная электроника: Учебное пособие / В.А. Гуртов, – Петрозаводск.: ПетрГУ, 2004. – 312 с.

117. Александров, Г.Н. Передача электрической энергии переменным током / Г.Н. Александров. – М.: Знак, 1998. – 271 с.

118. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – Юрайт-Издат, Высшее образование, 2009. – 480с.

119. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Монография / С.В. Федосов – Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010. – 364 с.

К 120. Митькин, Ю.А. расчету температурных полей объеме В электротехнического материала неоднородном распределении при диэлектрических потерь / Ю.А. Митькин, А.М. Соколов, Карвалью Надир Карина <u>Де//</u> Материалы Международной Нето Африкану научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2013. – С. 110–112.

121. Гусенков, А.В. Температурные режимы работы силового высоковольтного кабеля в электропередаче повышенной частоты / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды VI Международной молодежной научно-технической конференции, 9–13 ноября 2015 г.: Материалы конференции. Т. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 618–620.

122. Федосов, С.В. Методология исследования процессов теплопереноса и показателей электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты / С.В. Федосов, А.М. Соколов // Academia. PAACH. № 2. – 2012. – С. 117–123.

123. Гусенков, А.В. Применение разложения в ряд Фурье при расчете режимов работы полупроводникового преобразователя / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // Материалы Международной научнотехнической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2015. – С. 120–123.

124. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1/ Ю.В. Корицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.

125. Забарило, Д.А. Особенности расчета силового трансформатора повышенной частоты/ Д.А. Забарило // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. №3. – 2013. – С. 29 – 35.

126. Мейнке, Х. Радиотехнический справочник. Том 1 / Х. Мейнке. – М.: Книга по Требованию, 2012, – 577 с.

127. Кашкаров, А.П. Популярный справочник радиолюбителя / А.П. Кашкаров. – М.: РадиоСофт, 2008, – 412 с.

128. McLyman, T. Transformer and Inductor Design Handbook / T. McLyman, C. Wm. T. – CRC Press, 2011, – 667 p.

129. Дроздов, Н.Г. Электроматериаловедение / Н.Г. Дроздов, Н.В. Никулин. – М.: Высшая школа, 1973, – 312 с.

130. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – М.: «Энергия», 1976 – 544 с.

131. Лизунова, С.Д., Силовые трансформаторы. Справочная книга / С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

132. Иоссель, Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981. –288 с.

133. Шадриков, Т.Е. Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, А.С. Страхов // Электричество. № 1. – 2016. – С. 4–12.

134. Мельников, М.А. Электроснабжение промышленных предприятий / М.А. Мельников. – Томск: ТПУ – 2000, – 144 с.

135. Федосов, С.В. Методика расчета параметров электротепловой обработки бетонных смесей и железобетонных изделий на установках периодического действия/ С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Соколов // Известия ВУЗов. Строительство. № 5. – 2010. – С. 104–113.

136. Электронный справочник по физике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.abitura.com/handbook/

137. ГОСТ 9680-77 Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей.

138. Гусенков, А.В. Методика определения показателей энергетической эффективности высоковольтной электропередачи повышенной частоты / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2015. – С. 132–135.

139. ГОСТ 6697-83 Системы электроснабжения, источники, преобразователи и приемники электрической энергии переменного тока. Номинальные частоты от 0,1 до 10000 Гц и допускаемые отклонения.

140. Федосов, С.В. Электротепловая обработка железобетонных изделий токами повышенной частоты в условиях малых предприятий / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, О.В. Коровин, А.М. Соколов // Строительные материалы. № 5. – 2014. – С. 8–14.

141. Корявин, А.Р. Современные проблемы отечественной стандартизации испытательных напряжений и методов испытаний электрооборудования высокого напряжения/ А.Р. Корявин, О.В. Волкова, Е.А. Милкин // Электричество. №7. – 2013. – С.30–35.

142. Федосов, С.В., Методология исследования процессов теплопереноса и показателей электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты. / С.В. Федосов, А.М. Соколов // Academia. PAACH. № 2. – 2012. – С. 117–123.

143. Горобец, А.Н. Разработка метода расчёта тепловых режимов высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / А.Н. Горобец // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научнотехнической конференции, В 2 т. Т.1. – Иваново: ИГЭУ. – 2015 – С. 132–136.

144. Федосов, С.В. Оценка показателей экономической эффективности электротепловой обработки на предприятиях сборного железобетона / С.В. Федосов, В.И. Бобылёв, А.Б. Петрухин, А.М. Соколов // Промышленное и гражданское строительство. № 3. – 2013. – С. 54–57.

145. Шадриков, Т.Е. Выбор рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты/ Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов // Электротехника. № 10. – 2016. – С. 50–56.

# Приложение А (обязательное)

# Программная реализация методики расчета силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

 $U_1 = 250 B$  $U_2 = 3000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} B$ Мощность трансформатора  $P_{\rm BBLX} = 4000 \, Bm$  $U_{2} = 2449 B$  $I_{\rm GBAX} = \frac{P_{\rm GBAX}}{U_2} = 1,633 \, A$  $U_{\rm BBLX} = U_2$ f =13000 Гц  $k_5 = \frac{U_1}{U_2} = 0,102$  $\mu = 1700 \, \Gamma \mu$  $B_{m}=0.18\, \Gamma \mathrm{H}$  $\Delta T = 50^{\circ} C$  $n_{m} = 1$  $P_{mp} = \frac{P_{\text{sbix}}}{n_m} = 4000 \, Bm$  $U_{2mp} = \frac{U_2}{n_m} = 2449 B$ 

Выходная мощность одного трансформатора

$$P_{BBLX,mp} = \frac{P_{BBLX}}{n_m} = 4000 Bm$$
$$P_{H} = P_{BBLX,mp} = 4000 Bm$$

Мощность трансформатора

$$\eta = 0,97$$

$$P_{1} = \frac{P_{u}}{\eta}$$

$$P_{2} = P_{u} = 4000 Bm$$

$$P_{m} = P_{1} + P_{2} = 8123,711 Bm$$
Произведение  $S_{c} \cdot S_{0}$ :
$$k_{\phi} = 1 \quad k_{j} = 534 \quad k_{u} = 0,4 \quad y = -0,12$$

$$S_{c0} = \left(\frac{P_T \cdot 10^4}{4 \cdot k_{\phi} \cdot k_j \cdot k_u \cdot B_m \cdot f}\right)^{\frac{1}{1+y}} = 67.339 \, c\text{M}^4$$

Выбор сердечника и его параметров производится с помощью неравенства  $(S_c \cdot S_0)_{cm} \ge S_c \cdot S_0$ 

Выбираем магнитопровод из сердечника Ш20х28.

Число сердечников  $n_c = 3$ .

Фактическое значение одного сердечника:

$$S_{c01} = 29,568 \, cm^4$$

всего магнитопровода

$$S_{c0} = S_{c01} \cdot n_c = 88,704 \text{ cm}^4$$
  

$$l_{cpe1} = 14,4 \text{ cm}$$
  
Размеры окна:  

$$l_w = 1,2 \text{ cm}$$
  

$$h = 2,2 \text{ cm}$$
  

$$S_0 = 2 \cdot h \cdot l_w = 5,28 \text{ cm}^2$$
  

$$S_c = \frac{S_{c0}}{S_0} = 16,8 \text{ cm}^2$$

По формуле из справочника:

$$SS_c = 10\sqrt{\frac{P_{\scriptscriptstyle H}}{B_{\scriptscriptstyle m}} \cdot f} = 13,074 \, cm^2$$

Тепловая поверхность для Ш-образного сердечника определяется по следующему соотношению:

*H* = 3,25 см высота половины сердечника

*L* = 6,5 *см* длина сердечника

 $S = S_c = 16,8 \, cm^2$  площадь поперечного сердечника

 $l_0 = 2 \, c_M$  ширина среднего стержня

*b* = 2,8 *см* толщина сердечника

 $l_{cps} = l_{cps1} + 2 \cdot b \cdot (n_c - 1) = 25,6 \, cm$  средняя длина витка с учетом количества сердечников

 $S_{m1} = 2 \cdot \left[ H \cdot L + 2 \cdot H \cdot S + S \cdot L + 2 \cdot l_w \cdot (l_0 + 2 \cdot l_w + 2 \cdot h) \right]$  тепловая поверхность одного

сердечника

 $S_m = S_{ml} + (4 \cdot H \cdot b + 2 \cdot L \cdot b) \cdot (n_c - l) = 666, 89 \, cm^2$  тепловая поверхность всех

сердечников

Определим объем одного сердечника:

$$V_{c} = 2 \cdot (H \cdot L \cdot b - 2 \cdot b \cdot h \cdot l_{w}) = 88,732 \, c M^{3}$$

Тогда масса одного сердечника:

$$\gamma_c = 4,8 \frac{2}{cM^3}$$
$$M_c = V_c \cdot \gamma = 425,914 z$$

Определим число витков первичной обмотки:

$$w_{I} = \frac{U_{I} \cdot 10^{4}}{4 \cdot k_{\phi} \cdot B_{m} \cdot f \cdot S_{c}} = 15,898$$

Принимаем  $w_1 = 16$ 

Первичный ток:

$$I_{I} = \frac{P_{H}}{U_{I} \cdot \eta} = 16,495 \,\mathrm{A}$$

Плотность тока в обмотках:

$$j = k_j \cdot \frac{(S_{c0})^y}{100} = 3,117 \frac{A}{MM^2}$$

Сечение провода первичной обмотки:

 $k_2 = 1 -$ коэффициент обмотки

$$S_{\scriptscriptstyle MNDI} = \frac{k_2 \cdot I_1}{j} = 5,291 \text{M}\text{M}^2$$

Определяем эквивалентную глубину проникновения электромагнитной волны

Электротехнические параметры меди:

удельное сопротивление:  $\rho_{_{M}} = 0,175 \cdot 10^{-7} O_{M} \cdot M$ 

магнитная проницаемость вакуума:  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ эквивалентная глубина проникновения:  $b_{_M} = 1000 \sqrt{\frac{\rho_{_M}}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}} = 0,584 \, \text{мм}$ 

Диаметр одного провода должен быть меньше  $d_{\text{max}} = 2 \cdot b_{M} = 1,168 \text{ мм}$ 

Параметры провода вторичной обмотки выбираем из таблицы стандартных проводов (сечение  $S_{mnp1}$  перевести в мм<sup>2</sup>)

$$S_{mnp1} = 5,291 \text{ MM}^2$$

В результате выбираем провод с параметрами:  $d_{M.cml} = 1,12 \text{ мм}$ 

в количестве, шт.:  $n_{np} = 6$ 

$$d_{1_{\mu_{301}}} = 1,217 \text{ MM}$$

Выбор проводов по типу №2

$$S_{np} = 0,9852 \text{ мм}^2$$
  
 $S_{cmu3I} = \pi \cdot \frac{d_{Iu307}^2}{4} = 1,163 \text{ мм}^2$   
 $\rho_{II} = \rho_{M} \cdot \frac{10^6}{S_{np}} = 0,018 \frac{O_M}{M} \left(\frac{M \kappa O_M}{c_M}\right) -$ сопротивление единицы длины провода

Фактическое сечение провода первичной обмотки (должно быть близким к выше полученному значению)

$$S_{mnp1} = 5,291 \text{ MM}^2$$
$$S_{mcm1} = S_{np} \cdot n_{np} = 5,911 \text{ cm}^2$$

Определим сопротивление первичной обмотки:

$$R_{I} = l_{cps} \cdot w_{I} \cdot \rho_{II} \cdot \frac{10^{-2}}{n_{np}} = 0,012 \, Om$$

Определим потери в меди первичной обмотки:

$$k_3 = 1$$

$$\Delta P_1 = k_3 \cdot \left(k_2 \cdot I_1\right)^2 \cdot R_1 = 3,299 Bm$$

Число витков вторичной обмотки:  $k_1 = 2$ 

 $U_{np} = 2,5 B$  – падение напряжения на 1 транзисторе в открытом состоянии

$$w_{2} = \frac{w_{I} \cdot \left(U_{\text{BEX}} + k_{I} \cdot U_{np}\right)}{U_{I}} = 157,087$$

Принимаем  $w_2 = 158$ 

Определим сечение меди провода вторичной обмотки:

$$I_{H} = I_{Gbix} = 1,633 A$$

$$k_{4} = I$$

$$S_{M,np2} = \frac{k_{4} \cdot I_{H}}{j} = 0,524 \text{ MM}^{2}$$

Параметры провода вторичной обмотки выбираем из таблицы стандартных проводов (сечение  $S_{_{MNP2}}$  перевести в мм<sup>2</sup>) с учетом, что диаметр провода не может превышать:  $d_{_{max}} = 1,168$  мм

В результате получаются параметры:

$$d_{M.cm2} = 0,9 \text{ MM}$$

$$S_{M.cm2} = 0,6362 \text{ MM}^2$$

$$d_{2u30\pi} = 0,989 \text{ MM}$$

$$S_{cmu32} = \pi \cdot \frac{d_{2u30\pi}^2}{4} = 0,768 \text{ MM}^2$$

$$\rho_{12} = \rho_{M} \cdot \frac{10^6}{S_{M.cm2}} = 0,028 \frac{O_M}{M} \left(\frac{MKO_M}{CM}\right)$$

Определим сопротивление вторичной обмотки:

$$R_2 = l_{cpe} \cdot w_2 \cdot \rho_{12} \cdot 10^{-2} = 1,113 \, Om$$

Определим потери в меди вторичной обмотки:

$$\Delta P_2 = k_5 \cdot (k_4 \cdot I_1)^2 \cdot R_1 = 0,337 Bm$$

Общие потери в меди:

 $\Delta P_{M} = \Delta P_{1} + \Delta P_{2} = 3,636 Bm$ 

Определим потери в сердечнике, используя расчетное соотношение или график удельных потерь для выбранного материала:

$$P_{y\partial} = 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1,31} \cdot B_m^{2,49} = 5,62 \frac{Bm}{\kappa^2}$$

Определим общие потери в сердечнике:

$$\Delta P_c = \frac{2 \cdot P_{y\partial} \cdot M_c}{1000} \cdot n_c = 14,362 \, Bm$$

Суммарные потери в трансформаторе:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{M} + \Delta P_{c} = 17,998 \, Bm$$

Потери на единицу поверхности:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{S_m} = 0,027 \frac{Bm}{cm^2}$$

Перегрев поверхности составит:

 $k_m = 1, 2 \cdot 10^{-3} -$ коэффициент теплоотдачи

$$\Delta T = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{k_m \cdot S_m} = 22,49 \,^{o}C$$

КПД трансформатора:

$$\eta_m = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{mp}} = 0,9955$$

Расчет удельных характеристик трансформатора

Удельная масса меди:  $\gamma_m = 8,92 \frac{2}{cM^3}$ 

Масса медного провода в трансформаторе:

$$M_{np} = l_{cpe} \cdot \left(S_{np} \cdot n_{np} \cdot w_1 + S_{M,cm2} \cdot w_2\right) \cdot \gamma_M \cdot 10^{-2} = 445,512 \ c$$

Масса изоляции из эпоксидной смолы:

Удельная масса изоляции из эпоксидной смолы:  $\gamma_{epoks} = 1, 2 \frac{2}{cM^3}$ 

$$k_{u} = 0,4$$

$$M_{u3} = \frac{l_{cpe}}{k_{u}} \cdot \left(S_{np} \cdot n_{np} \cdot w_{l} + S_{M,cm2} \cdot w_{2}\right) \cdot \gamma_{epoks} \cdot 10^{-2} = 149,8359 \text{ c}$$

Общая масса трансформатора:

$$M_m = n_c \cdot M_c + M_{np} + M_{us} = 1873,089 \ c$$

Здесь учтена масса всех сердечников

Удельная масса на единицу мощности:

$$m_0 = \frac{M_m}{P_{\rm BMX}} = 0,468 \ \frac{\kappa^2}{\kappa Bm}$$

Объем трансформатора:

$$L = 6,5$$
 см;  $H = 3,25$  см  
 $b + 2 \cdot l_0 = 6,8$  см

$$v_0 = \frac{V_m}{P_{\text{вых}}} = 0,131 \frac{\partial M^3}{\kappa Bm}$$

## Приложение Б

213

### (обязательное)

# Программная реализация методики расчета установившихся режимов ЭТКПЧ с применением частотного анализа

% Расчет с разложением трапецеидального с паузой сигнала в ряд Фурье

% Исходные данные

А=0.235е3; % Амплитуда импульса

f=13200; % частота

T=1/f; % Период следования импульсов

ti=T/2; % Длительность импульса

N=100; % Число определяемых гармоник

uT=2.7; % В падение напряжения на транзисторе в стат.режиме

Iko=70; % А ток коллектора в стат.режиме

Rvno=uT/Iko; % Ом внутреннее сопротивление транзистора в стат.режиме

fa=10000; % Гц граничная частота транзистора

Muo=4\*pi\*1e-7; % Гн/м магнитная проницаемость вакуума

Rn=48.4/3; % Ом Сопротивление нагрузки (число в знаменателе-количество включенных нагревателей)

t1=0.7e-6;

t2=3.2e-6;

tm=(T-4\*t1-2\*t2)/2; %длительность амплитудного значения

% Параметры трансформатора

Н=3.2; % см высота половины сердечника

L=6.4; % см длина сердечника

b=2.6; % см ширина сердечника

lo=1.8; % см ширина среднего стержня

h=2.1; % см высота половины окна сердечника

lw=1.2; % см ширина окна

nc=2; % см число сердечников

dtm=4.8; % г/см3 плотность материала сердечника (феррит)

lv=18.5; % см средняя длина витка обмоток

W1=26; % число витков первичной обмотки

W2=5\*26; % число витков вторичной обмотки

d1=1.5; % мм диаметр провода первичной обмотки

d2=0.7; % мм диаметр провода вторичной обмотки

nw1=1; % число параллельных проводов первичной обмотки

nw2=1; % число параллельных проводов вторичной обмотки

rom=0.175е-7; % Ом м удельное сопротивление меди

Ls1=6.85e-6;

Ls2=6.85e-6\*(W2/W1)^2;

С=78.3е-12; % пФ емкость вторичной обмотки повышающего трансформатора

Lmu=8.363е-3; % Гн индуктивность намагничивания

Cl=1230e-12; % пФ емкость изоляции

Zv=75; % волновое сопротивление кабеля

lk=30; % м длина кабеля

dl=1.0; % мм диаметр одной жилы кабеля

nl=1; % число параллельных жил в кабеле

Rr=0.1; % сопротивление реактора

Q=0.000005;

Clo=Cl/lk;

l=30;

Cl=Clo\*l;

% Расчётные параметры

q=T/ti; % Скважность импульса

w=2\*pi/T; % Угловая частота

Xs1=Ls1\*w; % индуктивное сопротивление рассеяния на 1-ой гармонике 1 обмотки

Xs2=Ls2\*w; % индуктивное сопротивление рассеяния на 1-ой гармонике 2 обмотки

Xmu=Lmu\*w; % индуктивное сопротивление намагничивания на 1-ой гармонике

Xc=1/(w\*C); % емкостное сопротивление выходной емкости тр-ра на 1-ой гармонике

Vc=2\*(H\*L\*b-2\*b\*h\*lw)\*nc; % см3 объем всего сердечника

mc=Vc\*dtm; % г масса всего сердечника

Sc=lo\*b\*nc; % см2 сечение всего магнитопропода

Ktr=W2/W1; % коэффициент трансформации

Ri1=rom\*W1\*lv\*1e-2\*4/(nw1\*pi\*d1^2\*1e-6); % Ом активное сопротивление первичной обмотки на 50 Гц

Ri2=rom\*W2\*lv\*1e-2\*4/(nw2\*pi\*d2^2\*1e-6); % Ом активное сопротивление вторичной обмотки на 50 Гц

dei=1000\*sqrt(rom/(pi\*f\*Muo)); % эквивалентная глубина проникновения в меди на основн.гарм.

Bm=2500\*A/(W1\*f\*Sc); % Тл индукция в магнитопроводе

Pud=1.64e-3\*f^1.31\*Bm^2.49; % Вт/кг удельные потери в магнитопроводе

Pc=Pud\*mc/1000; % Вт полные потери магнитопроводе

Rim=A^2/Pc; % Ом активное сопротивление потерь в магнитопроводе

ffi=atan((Xs1+Xs2/Ktr^2-Xc)/(Ri1+Ri2/Ktr^2)); % фаза 1 гармоники

Ll=Zv^2\*Cl; % Гн Индуктивность линии

Xcl=2/(w\*Cl); % половина емкостного сопротивления линии

Xl=Ll\*w; % индуктивное сопротивление линии

Lr=1/(Q\*w^2\*Cl); %индуктивное сопротивление реактора

Xr=Lr\*w; %индуктивное сопротивление реактора

R4=Rr/Ktr^2; %активное сопротивление реактора, привед. к первичной стороне

dfe=1000\*sqrt(rom/(pi\*f\*Muo)); % мм эквивалентная глубина проникновения в меди и далее сопротивления на 1-ой гарм.

 $Rf1 = (dfe > = d1/2)*rom*W1*lv*1e-2*4/(nw1*pi*d2^2*1e-6) + (dfe < d1/2)*rom*W1*lv*1e-2/(nw1*pi*d2^2*1e-6) + (dfe < d1/2)*rom*W1*lv*1e-2/(nw1*pi*d2^2*1e-2) + (dfe < d1/2)*rom*W1*lv*1e$ 

2/(nw1\*pi\*(d1\*dfe-dfe^2)\*1e-6);

 $Rf2=(dfe>=d2/2)*rom*W2*lv*1e-2*4/(nw2*pi*d2^2*1e-6)+(dfe<d2/2)*rom*W2*lv*1e-2/(nw2*pi*(d2*dfe-dfe^2)*1e-6);$ 

```
Rfl = ((dfe > = dl/2)*rom*l/((pi*dl^2)*1e-6/4) + (dfe < dl/2)*rom*l/(pi*(dl*dfe-dfe^2)*1e-6))/nl;
```

alf=2\*pi\*f\*(Ll\*Cl)^0.5; % волновая длина линии на основной частоте

% Преобразование Фурье

Uvh=A/q-A/2; % постоянная составляющая сигнала

Uc=Uvh; % постоянная составляющая выходного сигнала на выходе тр-ра

Ul=Uvh; % постоянная составляющая выходного сигнала в конце линии

Un=Uvh; % постоянная составляющая выходного сигнала на нагрузке

- Pn=0;
- Ps=0;
- DP=0;
- DPs=0;
- DPlvT1=0;
- DPhvT1=0;
- DPmT1=0;
- DPl=0;
- DPlc=0;
- DPlvT2=0;
- DPhvT2=0;
- DPmT2=0;

### 216

% расчет мощности в нагрузке, потерь мощности и КПД

for k=1:N

% syms x;

```
%Uk0=int(0*sin(2*pi*(2*k-1)*f*x),0,t2/2);% Определение амплитуды k-ой составляющей сигнала (начало)
```

```
%Uk0=double(Uk0); %нулевой интеграл от 0-> t2/2
```

Uk0=0;

syms x;

```
Uk1=int(((x-t2/2)/t1)*sin(2*pi*(2*k-1)*f*x),t2/2,t1+t2/2);%
```

```
Uk1=double(Uk1); %интеграл на повышение от t2/2-> t1+t2/2
```

% syms x;

```
Uk2=int(sin(2*pi*(2*k-1)*f*x),t1+t2/2,t1+t2/2+tm);
```

%Uk2=double(Uk2); %интеграл максимума от t1+t2/2-> t1+t2/2+tm

```
Uk2 = (1/(2*pi*(2*k-1)*f))*(\cos((2*pi*(2*k-1)*f)*(t1+t2/2))-\cos((2*pi*(2*k-1)*f)*(t1+t2/2))) + (1+t2/2) + (1+t2/
```

1)\*f)\*(t1+t2/2+tm)));

syms x;

```
Uk3=int((1-(x-(t1+t2/2+tm))/t1)*sin(2*pi*(2*k-1)*f*x),t1+t2/2+tm,2*t1+t2/2+tm);
```

```
Uk3=double(Uk3); %интеграл на понижение е от t1+t2/2+tm-> 2*t1+t2/2+tm
```

%syms x;

```
Uk4=int(0*sin(2*pi*(2*k-1)*f*x),2*t1+t2/2+tm,2*t1+3*t2/2+tm);
```

```
%Uk4=double(Uk4); % нулевой интеграл от 2*t1+t2/2+tm -> 2*t1+3*t2/2+tm
```

Uk4=0;

syms x;

```
Uk5=int((-1)*((x-(2*t1+3*t2/2+tm))/t1)*sin(2*pi*(2*k-
```

1)\*f\*x), 2\*t1+3\*t2/2+tm, 3\*t1+3\*t2/2+tm);

```
Uk5=double(Uk5); %отрицательная часть интеграла от 2*t1+3*t2/2+tm -> 3*t1+3*t2/2+tm % syms x;
```

```
%Uk6=int((-1)*sin(2*pi*(2*k-1)*f*x),3*t1+3*t2/2+tm,3*t1+3*t2/2+2*tm);
```

```
%Uk6=double(Uk6); %интеграл максимума от 3*t1+3*t2/2+tm -> 3*t1+3*t2/2+2*tm
```

```
Uk6 = (1/(2*pi*(2*k-1)*f))*(\cos((2*pi*(2*k-1)*f)*(3*t1+3*t2/2+2*tm)) - \cos((2*pi*(2*k-1)*f)*(3*t1+3*t2/2+2*tm)) - \cos((2*k-1)*f)*(3*t1+3*t2/2+2*tm)) - \cos((2*k-1)*f)*(3*k-1)*f) - \cos((2*k-1)*f)*(3*k-1)*f) - \cos((2*k-1)*f)*(3*k-1)*f) - \cos((2*k-1)*f) -
```

```
1)*f)*(3*t1+3*t2/2+tm)));
```

syms x;

Uk7=int((((x-3\*t1-3\*t2/2-2\*tm)/t1)-1)\*sin(2\*pi\*(2\*k-

1)\*f\*x), 3\*t1+3\*t2/2+2\*tm, 4\*t1+3\*t2/2+2\*tm);

Uk7=double(Uk7); %интеграл снижения от 3\*t1+3\*t2/2+2\*tm -> 4\*t1+3\*t2/2+2\*tm % syms x;
%Uk8=int((0\*sin(2\*pi\*(2\*k-1)\*f\*x)),3\*t1+3\*t2/2+2\*tm,4\*t1+3\*t2/2+2\*tm);

%Uk8=double(Uk8); % нулевой интеграл от 4\*t1+3\*t2/2+2\*tm -> 4\*t1+2\*t2+2\*tm

Uk8=0;

Ak=2\*A\*f\*(Uk0+Uk1+Uk2+Uk3+Uk4+Uk5+Uk6+Uk7+Uk8);% Определение амплитуды кой составляющей сигнала (окончание)

Ai(k)=Ak;

Xs1k=Xs1\*(2\*k-1); % Индуктивное сопротивление рассеяния для k-ой гармоники 1 обмотки

Xs2k=Xs2\*(2\*k-1)/Кtr^2; % Индуктивное сопротивление рассеяния для k-ой гармоники 2 обмотки (привед. перв.стороне)

Xsk=Xs1k+Xs2k; % для справки

Xmuk=Xmu\*(2\*k-1); % Индуктивное сопротивление намагничивания для k-ой гармоники Xck=Xc/(2\*k-1)/Ktr^2; % Ёмкостное сопротивление тр-ра K-ой гармоники (привед. перв.стороне)

Xlk=Xl\*(2\*k-1)/Кtr<sup>^</sup>2; % индуктивное сопротивление линии к-ой гармоники (привед. перв.стороне)

Xclk=Xcl/(2\*k-1)/Кtr^2; % ёмкостное сопротивление половины линии к-ой гармоники (привед. перв.стороне)

Xrk=Xr\*(2\*k-1)/Кtr^2; % Индуктивное сопротивление реактора для К-ой гармоники (привед. перв.стороне)

de=1000\*sqrt(rom/(pi\*f\*Muo)/(2\*k-1)); % мм эквивалентная глубина проникновения в меди на к-ой гарм.

 $R1 = (de > = d1/2)*rom*W1*lv*1e-2*4/(nw1*pi*d2^2*1e-6) + (de < d1/2)*rom*W1*lv*1e-2*4/(nw1*pi*d2^2*1e-2*2$ 

2/(nw1\*pi\*(d1\*de-de^2)\*1e-6);

R3=40;

 $R2 = (de) = d2/2)*rom*W2*lv*1e-2*4/(nw2*pi*d2^2*1e-6) + (de < d2/2)*rom*W2*lv*1e-2*4/(nw2*pi*d2^2*1e-2*2)*rom*W2*lv*1e-2*2(nw2*pi*d2^2*1e-2*2)*rom*W2*lv*1e-2*2(nw2*pi*d2^2*1e-2*2)*rom*W2*lv*1e-2*2(nw2*pi*d2^2*1e-2*2)*rom*W2*lv*1e-2*2(nw2*pi*d2^2*1e-2*2)*rom*W2*rom*W2*lv*1e-2*2(nw2*pi*d2^2*1e-2$ 

2/(nw2\*pi\*(d2\*de-de^2)\*1e-6);

 $Rl = ((de > = dl/2)*rom*l/((pi*dl^2)*1e-6/4) + (de < dl/2)*rom*l/(pi*(dl*de-de^2)*1e-6))/nl;$ 

 $Rvn=2*Rvno*(1+((2*k-1)*f/fa)^2)^0.5;$  % внутреннее сопротивление транзисторов

R=R1+R2/Ktr^2+Rvn+Rl/Ktr^2; % активное сопротивление последовательное (для справки)

Bmk=abs(2500\*Ak/(W1\*f\*(2\*k-1)\*Sc)); % Тл индукция в магнитопроводе к-ой гармоники Pudk=1.64e-3\*(f\*(2\*k-1))^1.31\*Bmk^2.49; % Вт/кг удельные потери в магнитопроводе к-ой гармоники

Pck=Pudk\*mc/1000; % Вт полные потери магнитопроводе на к-ой гармонике

Rm=Ak^2/Pck/2; % Ом активное сопротивление потерь в магнитопроводе на к-ой гармонике

% расчёт токов напряжений и потерь

Z12=(-Xck\*Ktr^2\*1j)\*Rn/((-Xck\*Ktr^2\*1j)+Rn);

Z11=R1+Xs1k\*1j+Z12;

Z10=Xmuk\*Rm\*1j/(Rm+Xmuk\*1j);

Z9=Z11\*Z10/(Z11+Z10);

Z8=Z9+R2/Ktr^2+Xs2k\*1j;

Z7=((-Xclk\*1j)\*Z8)/(-Xclk\*1j+Z8); % далее расчёт для п-образной схемы замещения линии

Z6=Rl/Ktr^2+Xlk\*1j+Z7;

Z5=Z6\*(-Xclk\*1j)/(Z6-Xclk\*1j);

Z8=Z8\*(-Xck\*1j)/(Z8+(-Xck\*1j));% далее расчет по волн.уравнениям

 $al = 2*pi*f*(2*k-1)*(Ll*Cl/(l)^2)^0.5*(((1+(Rl/(2*pi*f*(2*k-1)*Ll))^2)^0.5-1)/2)^0.5;$ 

 $bt = 2*pi*f*(2*k-1)*(Ll*Cl/(l)^2)^0.5*(((1+(Rl/(2*pi*f*(2*k-1)*Ll))^2)^0.5+1)/2)^0.5;$ 

gm=al+bt\*1j;

sh=al\*l\*cos(bt\*l)+sin(bt\*l)\*1j;

ch=cos(bt\*l)+al\*l\*sin(bt\*l)\*1j;

Z5=(ch+Zv\*sh/(Z8\*Ktr^2))/((ch/(Z8\*Ktr^2))+sh/Zv)/Ktr^2;

Z4=Z5\*(R4+Xrk\*1j)/(Z5+R4+Xrk\*1j);

Z3=Z4\*(-Xck\*1j)/(Z4-Xck\*1j);

Z2=R2/Ktr^2+Xs2k\*1j+Z3; % далее расчёт для т-образной схемы замещения трансформатора

Zm=Xmuk\*Rm\*1j/(Rm+Xmuk\*1j);

Za=Z2\*Zm/(Z2+Zm);

Z1=R1+Rvn+Xs1k\*1j;

I1=Ak/(Z1+Za);

fis=angle(I1);

DPs=DPs+((abs(I1))/2^0.5)^2\*(2\*Rvno); % расчет потерь мощности в полупроводниковом преобразователе

DPlvT1=DPlvT1+((abs(I1))/2^0.5)^2\*R1; % мощность потерь в низковольтной обмотке T1 Ua=Ak-I1\*Z1;

DPmT1=((abs(Ua))/2^0.5)^2/Rm+DPmT1; % мощность потерь в магнитопроводе T1 I2=Ua/Z2;

DPhvT1=DPhvT1+((abs(I2))/2^0.5)^2\*R2/Кtr^2;% мощность потерь в высоковольтной обмотке T1

Uck=Z3\*I2; % напряжение к-ой гармоники на емкости в начале линии I3=Uck/Z6:

Ulk=Z7\*I3; % напряжение к-ой гармоники на емкости в конце линии

Il1=Uck/Z5; % ток в начале линии, далее расчет по волн. уравнениям

Ulk=Uck\*ch-Il1\*sh\*Zv/Ktr^2;

I4=Ulk/Z8; % ток в конце линии

alfk=alf\*(2\*k-1); % волновая длина линии на к-ой гармонике, начало расчета потерь мощности линии по волновым соотношениям

fiI4=angle(I4);

Ia4=abs(I4)\*cos(fiI4);

DPla=Ia4^2\*Rl/Ktr^2;

Pnat=(abs(Ulk))^2/(Zv/Ktr^2);

fiUl=angle(Ulk);

P2=abs(Ulk)\*abs(I4)\*cos(fiUl-fiI4);

 $DPlo = (Pnat/P2)^{2} (((abs(Uck)/abs(Ulk))^{2}+1)^{*}(1+sin(2^{*}alfk)/2/alfk)/2 - 1)^{*}(1+sin(2^{*}alfk)/2/alfk)/2 - 1)^{*}(1+sin(2^{*}alfk)/2 - 1)^{*}(1+sin(2^{*}alf$ 

(cos(alfk)+sin(alfk)/alfk)\*(((abs(Uck)/abs(Ulk))^2-

 $(P2/Pnat)^{2*}(sin(alfk))^{2})^{0.5}))/(sin(alfk))^{2}+Pnat^{Rl*}(alfk+(sin(alfk))^{2}/alfk)/2/P2/Xlk/Ktr^{2}.$ 

DPlc=DPlo\*DPla+DPlc;% конец расчета потерь мощности в линии по волновым соотношениям,

DPl=2\*(abs(Il1)/2^0.5)^2\*Rl/Ktr^2+DPl; % расчет потерь мощности в линии упрощ., используется

DPhvT2=DPhvT2+((abs(I4))/2^0.5)^2\*R2/Кtr^2; % расчет мощности потерь в высоковольтной обмотке T2

Ub=I4\*Z9;

DPmT2=((abs(Ub))/2^0.5)^2/Rm+DPmT2; % расчет мощности потерь в магнитопроводе T2 I5=Ub/Z11;

DPlvT2=DPlvT2+((abs(I5))/2^0.5)^2\*R1; % расчет мощности потерь в низковольтной обмотке T2

Unk=I5\*Z12;

Pn=Pn+((abs(Unk))/2^0.5)^2/Rn; % мощность в нагрузке

Pi(k)=((abs(Unk))/2^0.5)^2/Rn; % мощность k-ой гармоники

end

DPT1=DPlvT1+DPhvT1+DPmT1; % полная мощность потерь в T1

DPT2=DPlvT2+DPhvT2+DPmT2; % полная мощность потерь в T2

DP=DPs+DPT1+DPT2+DPl; % полная мощность потерь в электропередаче

EF=Pn/(Pn+DP); % КПД электропередачи

Rldc=rom\*l/((pi\*dl^2)\*1e-6/4); % сопротивление линии на постоянном токе

Idc=(DPl/(2\*Rldc))^0.5; % эквивалентный постоянный ток в кабеле

Ps=Pn+DP;

for k=1:N

Potni(k)=(Pi(k)/Pn)\*100; %вычисление относительной мощности несущую на себе k-ая гармоника

Uotni(k)=(Ai(k)/A)\*100; % относительная величина напряжения k-ой гармоники относительно номинального

end

Uvh=0; % постоянная составляющая сигнала

Uc=Uvh; % постоянная составляющая выходного сигнала на выходе тр-ра

Ul=Uvh; % постоянная составляющая выходного сигнала в конце линии

Un=Uvh; % постоянная составляющая выходного сигнала на нагрузке

% расчет осциллограмм

t=0:0.01e-6:300e-6;

for k=1:N

Uvh1=Uvh;

Uc1=Uc;

Ul1=Ul;

Un1=Un;

Ak=Ai(k);

Uvh=Uvh1+Ak\*sin((2\*pi\*(2\*k-1)\*t)/T); % Добавление k-ой гармоники к сигналу на входе в трансформатор

Xs1k=Xs1\*(2\*k-1); % Индуктивное сопротивление рассеяния для k-ой гармоники 1 обмотки

Xs2k=Xs2\*(2\*k-1)/Кtr^2; % Индуктивное сопротивление рассеяния для k-ой гармоники 2 обмотки (привед. перв.стороне)

Xsk=Xs1k+Xs2k; % для справки

Xmuk=Xmu\*(2\*k-1); % Индуктивное сопротивление намагничивания для k-ой гармоники Xck=Xc/(2\*k-1)/Ktr^2; % Ёмкостное сопротивление тр-ра K-ой гармоники (привед. перв.стороне)

Xlk=Xl\*(2\*k-1)/Кtr^2; % индуктивное сопротивление линии к-ой гармоники (привед. перв.стороне)

Xclk=Xcl/(2\*k-1)/Кtr^2; % ёмкостное сопротивление половины линии к-ой гармоники (привед. перв.стороне)

Xrk=Xr\*(2\*k-1)/Кtr<sup>2</sup>; % Индуктивное сопротивление реактора для К-ой гармоники (привед. перв.стороне)

de=1000\*sqrt(rom/(pi\*f\*Muo)/(2\*k-1)); % мм эквивалентная глубина проникновения в меди на к-ой гарм.

 $R1 = (de > = d1/2)*rom*W1*lv*1e-2*4/(nw1*pi*d2^2*1e-6) + (de < d1/2)*rom*W1*lv*1e-2*4/(nw1*pi*d2^2*1e-2*2$ 

2/(nw1\*pi\*(d1\*de-de^2)\*1e-6);

R3=40;

 $R2=(de>=d2/2)*rom*W2*lv*1e-2*4/(nw2*pi*d2^2*1e-6)+(de<d2/2)*rom*W2*lv*1e-2/(nw2*pi*(d2*de-de^2)*1e-6);$ 

 $Rl=((de>=dl/2)*rom*l/((pi*dl^2)*1e-6/4)+(de<dl/2)*rom*l/(pi*(dl*de-de^2)*1e-6))/nl;$ 

Rvn=2\*Rvno\*(1+((2\*k-1)\*f/fa)^2)^0.5; % внутреннее сопротивление транзисторов

R=R1+R2/Ktr<sup>2</sup>+Rvn+Rl/Ktr<sup>2</sup>; % активное сопротивление последовательное (для справки)

Bmk=abs(2500\*Ak/(W1\*f\*(2\*k-1)\*Sc)); % Тл индукция в магнитопроводе к-ой гармоники Pudk=1.64e-3\*(f\*(2\*k-1))^1.31\*Bmk^2.49; % Вт/кг удельные потери в магнитопроводе к-ой гармоники

Pck=Pudk\*mc/1000; % Вт полные потери магнитопроводе на к-ой гармонике

Rm=Ak^2/Pck/2; % Ом активное сопротивление потерь в магнитопроводе на к-ой гармонике

% расчёт

Z12=(-Xck\*Ktr^2\*1j)\*Rn/((-Xck\*Ktr^2\*1j)+Rn);

Z11=R1+Xs1k\*1j+Z12;

```
Z10=Xmuk*Rm*1j/(Rm+Xmuk*1j);
```

Z9=Z11\*Z10/(Z11+Z10);

Z8=Z9+R2/Ktr^2+Xs2k\*1j;

Z7=((-Xclk\*1j)\*Z8)/(-Xclk\*1j+Z8);

Z6=Rl/Ktr^2+Xlk\*1j+Z7; % далее расчёт для п-образной схемы замещения линии

Z5=Z6\*(-Xclk\*1j)/(Z6-Xclk\*1j); % окончание расчета по п-образной схеме (не используется)

Z8=Z8\*(-Xck\*1j)/(Z8+(-Xck\*1j));% далее расчет по волн.уравнениям

 $al = 2*pi*f*(2*k-1)*(Ll*Cl/(l)^2)^0.5*(((1+(Rl/(2*pi*f*(2*k-1)*Ll))^2)^0.5-1)/2)^0.5;$ 

 $bt = 2*pi*f*(2*k-1)*(Ll*Cl/(l)^2)^0.5*(((1+(Rl/(2*pi*f*(2*k-1)*Ll))^2)^0.5+1)/2)^0.5;$ 

gm=al+bt\*1j;

sh=al\*l\*cos(bt\*l)+sin(bt\*l)\*1j;

ch=cos(bt\*l)+al\*l\*sin(bt\*l)\*1j;

 $Z5=(ch+Zv*sh/(Z8*Ktr^2))/((ch/(Z8*Ktr^2))+sh/Zv)/Ktr^2;$ 

222 Z4=Z5\*(R4+Xrk\*1j)/(Z5+R4+Xrk\*1j);Z3=Z4\*(-Xck\*1j)/(Z4-Xck\*1j); $Z2=R2/Ktr^{2}+Xs2k*1j+Z3;$  % т-образной схемы далее расчёт для замещения трансформатора Zm=Xmuk\*Rm\*1j/(Rm+Xmuk\*1j); Za=Z2\*Zm/(Z2+Zm); Z1=R1+Rvn+Xs1k\*1j;I1 = Ak/(Z1 + Za);Ua=Ak-I1\*Z1; I2=Ua/Z2; Uck=Z3\*I2; % напряжение к-ой гармоники на емкости в начале линии fi=angle(Uck); % Фаза гармоники Uc=Uc1+abs(Uck)\*sin((2\*k-1)\*w\*t+fi)\*Кtr; % Добавление k-ой гармоники к выходному сигналу в начале линии I3=Uck/Z6; Ulk=Z7\*I3; % напряжение к-ой гармоники на емкости в конце линии II1=Uck/Z5; % ток в начале линии, далее расчет по волн. уравнениям Ulk=Uck\*ch-Il1\*sh\*Zv/Ktr^2; fil=angle(Ulk); % Фаза гармоники Ul=Ul1+abs(Ulk)\*sin((2\*k-1)\*w\*t+fil)\*Кtr; % Добавление k-ой гармоники к выходному сигналу в конце линии I4=Ulk/Z8; Ub=I4\*Z9; I5=Ub/Z11; Unk=I5\*Z12; fin=angle(Unk); % Фаза гармоники Un=Un1+abs(Unk)\*sin((2\*k-1)\*w\*t+fin); % Добавление k-ой гармоники к выходному сигналу на нагрузке End figure (1) subplot(4,1,1);plot(t, Uvh) subplot(4,1,2);plot(t, Uc) subplot(4,1,3);plot(t, Ul) subplot(4,1,4);plot(t, Un)

# Приложение В

223

## (обязательное)

# Программно-алгоритмическая реализация методики численноаналитического электротеплового расчета высоковольтных кабельных линий в составе ЭТКПЧ

%% тепловой расчет высоковольтного кабеля повышенной частоты

% Исходные данные

D=4.5e-3; % наружный диаметр, м

d=1e-3; %диаметр жилы, м

U=1250; % рабочее напряжение, кВ

Tv=40; %Температура воздуха, С

Tsn=79.3; % Температура на последнем поверхностном слое, С

f=13200; %Частота основной гармоники, Гц

Eps=2.3; % Диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля

Eps0=8.85e-12; % Электрическая постоянная

lmd=0.34; %Коэффициент теплопроводности, Вт\*м/С;

n=100; %Число слоев

dlt=(D-d)/(2\*n); %Толщина одного расчётного слоя;

alfk=2.5\*(Tsn-Tv)^0.25; %Коэффициент теплоотдачи, Вт/м2\*С

Psn=alfk\*(Tsn-Tv); %плотность теплового потока на поверхности кабеля, Вт/м2

N=30; % число гармоник

Tk=Tsn;

Psk=Psn;

rk=D/2-dlt/2;

rom=0.175e-7;

r(1)=D/2;

T(1)=Tsn;

Piz=0;

Piz50=0;

TT=1/f; % Период следования импульсов

t2=3.2e-6;

tm=(T-4\*t1-2\*t2)/2; %длительность амплитудного значения

%Расчет

for k=1:1:n;

r(k+1)=D/2-dlt\*k; % радиус к-го слоя (одномерный массив радиусов)

Tko=Tk+(Psk\*dlt/(2\*lmd)); %Температура на поверхности предыдущего слоя

T(k+1)=Tko; % массив температур на поверхности каждого слоя

Tav=(Tk+Tko)/2; % Средняя температура в слое

qk=0;

for j=1:1:N % цикл по гармоникам

%syms x;

%Uj0=int(0\*sin(2\*pi\*(2\*j-1)\*f\*x),0,t2/2);% Определение амплитуды j-ой составляющей сигнала (начало)

%Uj0=double(Uj0); %нулевой интегнал от 0-> t2/2

Uj0=0;

syms x;

Uj1=int(((x-t2/2)/t1)\*sin(2\*pi\*(2\*j-1)\*f\*x),t2/2,t1+t2/2);%

Uj1=double(Uj1); %интеграл на повышение от t2/2-> t1+t2/2

%syms x;

```
%Uj2=int(sin(2*pi*(2*j-1)*f*x),t1+t2/2,t1+t2/2+tm);
```

%Uj2=double(Uj2); %интеграл максимума от t1+t2/2->t1+t2/2+tm

 $Uj2 = (1/(2*pi*(2*j-1)*f))*(\cos((2*pi*(2*j-1)*f)*(t1+t2/2))-\cos((2*pi*(2*j-1)*f)*(t1+t2/2))) + (1+t2/2)) + (1+t2/2) + (1+t2/2) + (1+t2/2) + (1+t2/2)) + (1+t2/2) + (1+t$ 

1)\*f)\*(t1+t2/2+tm)));

syms x;

Uj3=int((1-(x-(t1+t2/2+tm))/t1)\*sin(2\*pi\*(2\*j-1)\*f\*x),t1+t2/2+tm,2\*t1+t2/2+tm); Uj3=double(Uj3); %интеграл на понижение е от t1+t2/2+tm-> 2\*t1+t2/2+tm %syms x;

```
Uj4=int(0*sin(2*pi*(2*j-1)*f*x),2*t1+t2/2+tm,2*t1+3*t2/2+tm);
```

```
%Uj4=double(Uj4); % нулевой интеграл от 2*t1+t2/2+tm -> 2*t1+3*t2/2+tm Uj4=0;
```

syms x;

 $Uj5=int((-1)^*((x-(2^*t1+3^*t2/2+tm))/t1)^*sin(2^*pi^*(2^*j-1)/t1)^*)$ 

1)\*f\*x), 2\*t1+3\*t2/2+tm, 3\*t1+3\*t2/2+tm);

Uj5=double(Uj5); %отрицательная часть интеграла от 2\*t1+3\*t2/2+tm -> 3\*t1+3\*t2/2+tm

%syms x;

%Uj6=int((-1)\*sin(2\*pi\*(2\*j-1)\*f\*x),3\*t1+3\*t2/2+tm,3\*t1+3\*t2/2+2\*tm);

%Uj6=double(Uj6); %интеграл максимума от 3\*t1+3\*t2/2+tm ->

3\*t1+3\*t2/2+2\*tm

cos((2\*pi\*(2\*j-1)\*f)\*(3\*t1+3\*t2/2+tm)));

syms x;

Uj7=int(((((x-3\*t1-3\*t2/2-2\*tm)/t1)-1)\*sin(2\*pi\*(2\*j-

1)\*f\*x), 3\*t1+3\*t2/2+2\*tm, 4\*t1+3\*t2/2+2\*tm);

Uj7=double(Uj7); %интеграл снижения от 3\*t1+3\*t2/2+2\*tm -> 4\*t1+3\*t2/2+2\*tm

%syms x;

%Uj8=int((0\*sin(2\*pi\*(2\*j-1)\*f\*x)),3\*t1+3\*t2/2+2\*tm,4\*t1+3\*t2/2+2\*tm);

%Uj8=double(Uj8); %нулевой интеграл от 4\*t1+3\*t2/2+2\*tm -> 4\*t1+2\*t2+2\*tm

Uj8=0;

Аj=2\*U\*f\*(Uj0+Uj1+Uj2+Uj3+Uj4+Uj5+Uj6+Uj7+Uj8);% Определение амплитуды j-ой составляющей сигнала (окончание)

fj=f\*(2\*j-1); % частота гармоники

 $tangk = 5e - 13*Tav^{5} - 2e - 10*Tav^{4} + 2e - 8*Tav^{3} - 9e - 7*Tav^{2} + 3e - 5*Tav + 0.0001;$ 

% Формула для тангенса

Epsk=Eps; %Формула для зависимости эпсилон от температуры

Uj=Aj; % Определение амплитуды j-ой гармоники сигнала

C=2\*pi\*Epsk\*Eps0/log(D/d); % погонная емкость кабеля

Q=Uj\*C; % погонный заряд на жиле j-й гармоники

Ejk=Q/(2\*pi\*Eps\*Eps0\*rk\*2^0.5); % напряженность поля в к-ом слое j-й гармоники (эфф. значение)

qk=qk+Ejk^2\*2\*pi\*fj\*Eps\*Eps0\*tangk; %Плотность теплового потока от потерь в к-м слое, цикл по всем гармоникам

end

Vk=2\*pi\*rk\*dlt\*1; %Объем слоя

Sk=2\*pi\*(rk+dlt/2); %Площадь поверхности k-ого слоя

Pdk=qk\*Vk/Sk; %Мощность теплового потока от диэлектрических потерь

Psk=Psk-Pdk; % мощность теплового потока на поверхности предыдущего слоя

Piz=Piz+qk\*Vk; % суммирование мощности диэлектрических потерь

Q=U\*C; % погонный заряд на жиле 50 гц

Ek50=Q/(2\*pi\*Eps\*Eps0\*rk); % напряженность поля в к-ом слое 50 гц

tangk50=tangk; % тангенс дельта при 50 Гц

qk50=Ek50^2\*2\*pi\*50\*Eps\*Eps0\*tangk50; % Плотность теплового потока от потерь

в к-м слое при 50 гц

Piz50=Piz50+qk50\*Vk % мощность диэл. потерь в к-м слое при 50 Гц

Tk=Tko;

rk=rk-dlt;

end

Rpr=4\*rom/(pi\*d^2); %Сопротивление жилы (1 пог.м)

```
I=(Psk*2*pi*(d/2)/Rpr)^0.5; % Ток кабеля
```

Ppr=Psk\*2\*pi\*(d/2); % мощность потерь в проводе

figure (1)

```
subplot(1,1,1);plot(r,T);
```

# Приложение Г (обязательное)

## Оценка показателей технико – экономической эффективности электротехнического комплекса повышенной частоты

Важным шагом в решении вопроса о возможности и целесообразности практического применения ЭТКПЧ на основе показателей энергетической эффективности является их сравнение с установками промышленной частоты 50 Гц (рис. Г.1). При этом не следует забывать, что по рекомендациям ПУЭ [76], массогабаритным и стоимостным показателям силовых трансформаторов такое сравнение уже явно не пользу комплексов на основе напряжения промышленной частоты [76, 110, 111]. В качестве вариантов сравнения следует использовать ЭТКПЧ и промышленной частоты 50 Гц, электрические схемы которых показаны на рис. Г.2 и Г.3.

Предполагается, что электротехнический комплекс промышленной частоты (рис. Г.3) выполнен с применением однофазных силовых трансформаторов промышленного изготовления типа ОМ–2,5/6, основные параметры которых приведены в табл. Г.1 согласно сведениям предприятий изготовителей. Для понижения напряжения допускается использовать и другие трансформаторы промышленной частоты. Выбор трансформатора такого типа обусловлен близостью его номинальной мощности параметрам использованной в экспериментах установки (рис. 3.18, табл. 4.3,4.4). В качестве высоковольтной кабельной линии рассматривался кабель типа РК–75 длиной 30 м.

Номинальная мощность, кВА	2,5
Номинальное первичное напряжение, кВ	6
Номинальное вторичное напряжение, кВ	0,23
Номинальный первичный ток, А	0,417
Номинальный вторичный ток, А	10,89
Номинальная частота, Гц	50
Напряжение короткого замыкания, %	5,5

Таблица Г.1 Технические характеристики трансформатора ОМ 2,5/6

Ток холостого хода, %	23
Потери холостого хода, Вт	40
Потери короткого замыкания, Вт	90
Масса, кг, не более	65

Определение мощности потерь  $\Delta P$  в такой электропередаче (рис. 3.18) при мощности, передаваемой в нагрузку равной номинальной мощности силового трансформатора ( $P_{H}$ =2,5 кВт – предполагается, что нагрузка имеет активный характер), производится суммированием мощности потерь XX и K3 двух трансформаторов согласно табл. Г.1 и мощности потерь в кабельной линии, вычисляемой с помощью формулы (2.150). Это позволяет определить относительное значение мощности потерь по формуле:

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{P_H + \Delta P} \,. \tag{\Gamma.1}$$

КПД электропередачи определится из соотношения (2.150). На рис. Г.1 представлены полученные результаты вычислений значения КПД И относительной величины мощности потерь энергии сравниваемых вариантов, выраженные В процентах. Эти сведения демонстрируют значительное превосходство электротехнического комплекса повышенной частоты (рис. Г.2) над электропередачей промышленной частоты по показателям энергетической эффективности.



Рис. Г.1. Сравнение КПД и величины мощности потерь электропередачи (ЭП) промышленной частоты 50 Гц и электропередачи (электротехнического комплекса) повышенной частоты 13 кГц

В ЭТКПЧ наблюдается практически 4-кратное снижение потерь энергии и существенное повышение КПД. При этом существует возможность дальнейшего

улучшения показателей энергетической эффективности полупроводникового преобразователя напряжения и электропередачи повышенной частоты.

Для оценки технико–экономических показателей ЭТКПЧ следует провести сравнение основных конструкционных технических решений и их стоимости с возможными альтернативными вариантами электроснабжения потребителей, например, устройств электротепловой обработки бетона.

Подробный технико-экономический анализ (сроки окупаемости, ЧДД, рентабельность, и т.п.) варианта ЭТКПЧ рис. 1.11 требует знания конкретных производственных условий (количества потребителей, мощности потребителей, тип выпускаемых изделий и т.п.), представляет собой достаточно сложное и трудоемкое мероприятие и является темой отдельного научного исследования.

Предварительную оценку технико-экономической эффективности предлагаемого технического решения (рис. 1.11) можно выполнить посредством сравнения двух альтернативных вариантов, которые схематично представлены на рис. Г.2 и рис. Г.3. Организация ЭТО потребует размещения множества потребителей с применением повышенной частоты, число которых на крупных предприятиях сможет исчисляться десятками или сотнями единиц [25-30]. Однако В ознакомления технико-экономическими целях с параметрами целесообразно рассмотреть наиболее простые варианты рис. Г.2 и рис. Г.3

Первый из них (рис. Г.2) представляет собой ЭТКПЧ, состоящий из полупроводникового преобразователя и высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты, повышающих/понижающих трансформаторов повышенной частоты и одного потребителя (нагрузки):



Рис. Г.2. Электрическая схема ЭТКПЧ, состоящего из транзисторного преобразователя и высоковольтной кабельной электропередачи: 1 – полупроводниковый преобразователь напряжения; 2, 3 – соответственно повышающий и понижающий высоковольтные трансформаторы, 4 – высоковольтная кабельная линия; 5 – нагрузка

В качестве альтернативного варианта сравнения следует использовать комплекс промышленной частоты, электрическая схема которой показана на рис. Г.3.



Рис. Г.3. Электрическая схема комплекса на основе напряжения промышленной частоты: 1 – повышающий трансформатор; 2 – высоковольтная кабельная линия; 3 – понижающий трансформатор; 4 – преобразователь частоты; 5 – нагрузка

Анализируя варианты схемы исполнения электрической сети рис. Г.2 и Г.3 можно выделить, что общим элементом выполнения обеих схем является высоковольтная кабельная электропередача  $l_K$ , которая в обоих вариантах может быть выполнена на основе радиочастотного кабеля (например, РК–50, РК–75). Стоимость кабельной линии составляет величину  $\mathcal{U}_{KR}$ .

Капиталовложения в силовое оборудование для установки, представленной на рис.Г.2, определяются по формуле:

$$\mathcal{U}_{f} = \mathcal{U}_{\Pi/\Pi} + \mathcal{U}_{TP} + \mathcal{U}_{K\Pi} \tag{(\Gamma.2)}$$

где  $U_{\Pi/\Pi}$  – стоимость полупроводникового преобразователя,  $U_{\Pi P}$  – стоимость силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты,  $U_{K\Pi}$  – стоимость кабеля для изготовления кабельной линии. На основании данных [111] стоимость  $U_{\Pi P}$  определяется как стоимость отдельных материалов (обмотки, сердечники, изоляция) и стоимость изготовления конечного устройства.

Расчет капиталовложений в установку промышленной частоты (рис. Г.3) аналогичен (Г.2) и выполняется по формуле:

$$\mathcal{U}_{50} = \mathcal{U}_{\Pi/\Pi} + \mathcal{U}_{TP} + \mathcal{U}_{K\Pi} \,. \tag{(\Gamma.3)}$$

Таким образом, основная величина затрат на организацию сети электроснабжения промышленной частоты приходится на стоимость силовых высоковольтных трансформаторов промышленной частоты и преобразователя частоты с учетом того, что стоимость высоковольтного кабеля не превышает нескольких процентов от общей величины капиталовложений.

Удобным способом сравнения различных технических решений (рис. Г.2 и рис. Г.3) является также оценка удельных стоимостных параметров ЭТКПЧ и промышленной частоты, т.е. определение затрат в расчете на единицу передаваемой мощности (1 кВт). По аналогии с расчетом удельных показателей для силовых трансформаторов повышенной частоты (разд. 2.4.1) этот параметр для электротехнических комплексов может быть рассчитан следующим образом:

$$\mathcal{I}_{\mathcal{V}\mathcal{I}} = \frac{\mathcal{I}_f(\mathcal{I}_{50}) + \mathcal{I}_{MOHT}}{P_H}.$$
(\Gamma.4)

где  $U_{MOHT}$  – значения капитальных затрат на монтаж установки,  $P_H$  – мощность, передаваемая в нагрузку.

Одновременно с разницей в капиталовложениях схем в рис. Г.2 и Г.3, разными будут переменные издержки (И) при эксплуатации, которые согласно [35] определяются:

$$M = \Delta P \cdot \mathcal{P}, \tag{\Gamma.5}$$

где *△P* – потери активной мощности в элементах электротехнического комплекса, Э – стоимость электроэнергии. Потери активной мощности должны учитываться во всех элементах электротехнического комплекса: полупроводниковый преобразователь напряжения, трансформаторы; кабельные линии.

Согласно приведенной методике оценки технико–экономических показателей выполнен расчет показателей технико–экономической эффективности ЭТКПЧ (рис. Г.2), а также отдельных его элементов (силовые трансформаторы, полупроводниковых преобразователь напряжения), и комплекса промышленной частоты (рис. Г.3).

Одним из важных технических и эксплуатационных показателей силовых трансформаторов является их удельная масса. т.е. масса, приходящаяся на единицу номинальной мощности:

$$m_{\rm VII} = \frac{m_{\rm T}}{P_{\rm HOM}},\tag{\Gamma.6}$$

где *m<sub>T</sub>* – масса, кг, трансформатора, *P<sub>HOM</sub>* – номинальная мощность трансформатора (определяется на стадии расчета разд. 2.4, или является паспортными данными изготовленного трансформатора).

Этот показатель оказывает влияние на условия и стоимость транспортировки, а также монтажно–строительных работ  $\mathcal{U}_{MOHT}$  (Г.4). На рис. Г.4 представлены зависимости удельной массы силовых трансформаторов повышенной частоты от частоты рабочего переменного напряжения.



Рис. Г.4. Зависимости удельной массы от частоты для трансформаторов непромышленной частоты различной номинальной мощности: 1 – 16 кВА, 2 – 10 кВА, 3 – 4 кВА

Из рис. Г.4 следует, что увеличение частоты приводит к существенному снижению удельной массы трансформатора кг/кВА: при увеличении частоты от 5 до 20 кГц удельная масса снижается в 2–3 раза. Таким образом, повышение частоты является эффективной мерой уменьшения массы трансформаторов повышенной частоты. Для сравнения на рис. Г.5 приведены значения удельной массы трансформаторов промышленной частоты, полученные в результате обработки сведений об их справочных технических показателях (данные взяты из интернета, компаний–производителей оборудования).



Рис. Г.5. Значения удельной массы силовых трансформаторов промышленной частоты: 1 – ОМП 4 кВА/6 кВ; 2 – ОМП 10 кВА/6кВ; 3 – ОМП 20 кВА/6кВ; 4 – ТМЭ 400 кВА/6кВ; 5 – ТДЦ 400 МВА/500 кВ

Сопоставление сведений рис. Г.4 и рис. Г.5 позволяет сделать вывод, что и по трансформаторы этому показателю повышенной частоты многократно трансформаторы промышленной превосходят частоты. Например, для повышенной соизмеримой трансформаторов частоты мощности значение удельной массы оказывается в 20-35 раз меньше, чем для трансформаторов промышленной частоты.

Результаты рис. Г.5 свидетельствуют о значительном снижении удельной массы трансформаторов промышленной частоты по мере увеличения их номинальной мощности. Это обуславливает наличие в настоящее время рост единичной номинальной мощности высоковольтных силовых трансформаторов. Однако трансформаторам промышленной частоты удается приблизиться к трансформаторам повышенной частоты (рис. Г.4) по величине удельной массы лишь при номинальной мощности, близкой к предельной (ТДЦ 400MBA/500кВ – рис. Г.5). Другим важным техническим и эксплуатационным параметром силовых высоковольтных трансформаторов, соответствующим предыдущему по своему практическому значению, является удельный объём:

$$V_{y_{\mathcal{I}}} = \frac{V_T}{P_{HOM}},\tag{\Gamma.7}$$

где V<sub>T</sub> – объём, определяемый габаритными размерами силового трансформатора. На рис. Г.6 представлены сведения по величине этого параметра для трансформаторов повышенной и промышленной частоты. Эти результаты, как в предыдущем случае, демонстрируют явное преимущество трансформаторов повышенной частоты.



Рис. Г.6. Зависимость удельного объёма силовых трансформаторов от их номинальной мощности

Сравнение геометрических размеров и массы изготовленного экспериментального образца трансформатора повышенной частоты, согласно методике (разд. 2.4, Приложение А), номинальной мощностью 2,5 кВт, напряжением  $U_1$ =250 В, и  $U_2$ =1250 В и массой 1,9 кг с наиболее близким аналогом промышленного изготовления ОМ 2,5/6, массой 65 кг (характеристики приведены в табл. Г.1) показано на рис. Г.7.



Рис. Г.7. Сравнение габаритных характеристик силовых трансформаторов повышенной частоты (слева) и промышленной частоты (справа): размеры указаны в мм.

Важная роль в определении возможности и целесообразности применения ЭТКПЧ принадлежит стоимостным показателям. Поэтому с привлечением литературных источников [35,110] и интернет ресурсов для трансформаторов повышенной и промышленной частоты были выполнены оценки их рыночной стоимости и удельной стоимости (с учётом НДС):

$$\mathcal{U}_{\mathcal{VI}} = \frac{\mathcal{U}_T}{P_{HOM}},\tag{\Gamma.8}$$

где *Ц*<sub>*T*</sub> – стоимость приобретения (изготовления) трансформатора.

Расчет стоимости трансформатора повышенной частоты (на осень 2016 года), мощностью 2,5 кВА представлен в табл. Г.2.

Наименование детали	Количество штук	Цена за 1 штуку, руб.	Общая стоимость, руб.
Сердечник ферритовый Ш20х28	4	400	1600
Обмотка первичная 1,5 мм <sup>2</sup>	м/п	50	50
Обмотка вторичная 0,7 мм <sup>2</sup>	м/п	100	100
Каркас из картона	1	50	50
Изоляционный материал (пропитка)	ШТ	50	50
Стоимость изготовления (равна стоимости материалов)	ед	1850	1850
			Итого 3700

Таблица Г.2 Расчет стоимости трансформатора повышенной частоты 2,5 кВт

Для трансформатора ОМ 2,5/6 средняя стоимость на эту же дату согласно интернет – источникам 39850 руб. Согласно (Г.8) удельная стоимость на кВА мощности трансформаторов повышенной частоты – 1480 руб/кВА, трансформаторов промышленной частоты – 15940 руб/кВА, т.е. приблизительно на порядок выше, чем у трансформаторов повышенной частоты.

Аналогичные оценки были выполнены при различных значениях номинальной мощности силовых трансформаторов повышенной и промышленной частоты. Полученные результаты представлены на рис. Г.8 и показывают значительное снижение удельной стоимости силовых трансформаторов по мере увеличения их номинальной мощности. При этом трансформаторы повышенной частоты и по этому показателю имеют явное преимущество: при одинаковом значении номинальной мощности их удельная стоимость в среднем в 4,5-6 раз ниже, чем у трансформаторов промышленной частоты. Одинаковые значения удельной стоимости достигаются при номинальной мощности трансформаторов промышленной частоты, которая в 20-60 раз больше мощности трансформаторов повышенной частоты.



Рис. Г.8. Зависимость удельной стоимости трансформаторов промышленной и повышенной частоты от их номинальной мощности, треугольник – расчетное значение согласно табл. Г.2

Одновременно со стоимостью трансформаторов повышенной частоты выполнена оценка полупроводникового преобразователя для определения капиталовложений. Результаты представлены в табл. Г.3 (цены – осень 2016 г.). Таблица Г.3 Расчет стоимости преобразователя напряжения на мощность 5 кВт

Наименование летали	Количество штук	Цена за 1 штуку, руб.	Общая стоимость, руб.		
	Транзисторы				
КТ 805 Б	2	32	64		
KT 602	2	16	32		
IRG4PSH71UDPBF	4	1000	4000		
	Дио	ды			
Д 248 Б	4	70	280		
Д 814 Д	2	14	28		
КД 906 А	1	90	90		
KC 403 A	1	80	80		
Тиристор: КУ 202 Н	1	39	39		
Трансформатор питания	1	200	200		
Резистор	1	15	15		
Конденсатор	1	30	30		
Амперметр	1	400	400		
Вольтметр	1	400	400		
Корпус	1	800	800		
Плата	1	100	100		
Стоимость изготовления	50%	6650	3325		
			Итого 9975		

Сравнение стоимостных показателей электротехнического комплекса повышенной частоты и технического решения в виде электропередачи промышленной частоты при одинаковой номинальной мощности (2,5 кВА) приведены в табл. Г.4. Стоимость погонного метра кабеля РК–75 принимается равной 16 руб/м.п. (цены – осень 2016 г.).

Таблица	Γ4	Стоимостные	показатели
таолица	I .T		nonasaronn

Показатель Капиталовложения в трансформаторы	Электропередача промышленной частоты 50 Гц	Электротехнический комплекс повышенной частоты 13 кГц	
$H_{\scriptscriptstyle TP}$ , руб	2x39850=79700	2x3700 = 7400	
Капиталовложения в кабельные линии РК-75 /-30 м // руб	480	480	
Капиталовложения в преобразователь	0075	0075	
напряжения $\mathcal{U}_{\Pi/\Pi}$ , руб	9975	9975	
Стоимость монтажных работ	Одинаковая	Одинаковая	
Итого	90155	17855	
Удельная стоимость оборудования $\mathcal{U}_{\scriptscriptstyle V\!\mathcal{I}}$ , руб/к $\mathrm{BA}$	36062	7142	

Из табл. Г.4 следует, что удельная стоимость оборудования в случае применения ЭТКПЧ приблизительно в 4,5 раза ниже чем при использовании электроустановки промышленной частоты.

Таким образом, полученные значения технико–экономических параметров позволяют говорить о полном и значительном превосходстве ЭТКПЧ над устройствами промышленной частоты 50 Гц как с точки зрения технико– экономических параметров ( $\mathcal{U}_{yg}$ , масса, объем и т.п.), так и с точки зрения параметров энергетической эффективности (КПД, потери мощности).

# Приложение Д (обязательное)

## Акт внедрения результатов диссертационной работы



#### AKT

о внедрении результатов диссертационной работы Шадрикова Т.Е. «Методики расчета установившихся режимов и компонентов локальных электротехнических комплексов повышенной частоты»

Настоящим актом подтверждается, что на основе результатов, полученных аспирантом Шадриковым Т.Е. в рамках диссертационных исследований, а именно методов расчета основных конструктивных элементов электротехнических комплексов повышенной частоты - трансформаторов, кабельных линий электропередачи был создан макетный образец электротехнического комплекса повышенной частоты. Проведены испытания действующего макета электротехнического комплекса повышенной частоты в производственных условиях.

Результаты диссертационной работы учтены при составлении перспективных планов развития, модернизации и технического перевооружения Ивановской домостроительной компании. Предложенные в работе расчетные методы используются при разработке нового и высокоэффективного технологического оборудования.

Технический директор ОАО «ДСК»

<u>Желтиков Н.М.</u> (ФИО)

Начальник ПЖБИ-5 ОАО «ДСК»

Мясников А.А.

# Приложение Е

#### (обязательное)

#### Акт внедрения результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ» Проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» В.В. Шутенко «С фтба во в С. мвгно 2016 г.

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Т.Е. Шадрикова «Методики расчета установившихся режимов и компонентов локальных электротехнических комплексов повышенной частоты», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Результаты диссертационной работы Шадрикова Т.Е. используются в учебном процессе на кафедре «Автоматика и радиоэлектроника» (АРЭ) Текстильного института Ивановского государственного политехнического университета при подготовке бакалавров по направлению 11.03.01 «Радиотехника», а также магистров по направлению 15.04.04 «Автоматизация производств» изучении технологических процессов при дисциплин «Электроника», «Основы конструирования и технологии производства РЭС», «Основы научных исследований», «Источники вторичного электропитания», «Проектирования источников вторичного электропитания РЭА», «Полупроводниковые преобразователи напряжения», «Силовые электронные устройства», также при подготовке аспирантов по направлению 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы».

Первый проректор-директор Текстильного института, д.т.н., профессор

Н.А. Кулида

Директор центра планирования и организации учебного процесса

Е.В.Зиновьева

Декан факультета механики и автоматики Текстильного института, д.т.н., профессор

v Lybea А.А. Тувин

# Приложение Ж (обязательное)

## Акт внедрения результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ» Проректор по учебной работе ФГБОУ BO «Ивановский госуларственный 🖉 энергетический университет имени В.И. Ленина» А.В. Гусенков NOH2 2016 г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

#### результатов диссертационной работы старшего преподавателя кафедры «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» Т.Е. Шадрикова

Настоящим актом подтверждается, что результаты кандидатской диссертационной работы Шадрикова Т.Е. на тему «Методики расчета установившихся режимов и компонентов локальных электротехнических комплексов повышенной частоты» используются на кафедре «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» ИГЭУ в учебном процессе подготовки студентов по профилю «Высоковольтная электроэнергетика и электротехника и и по профилю «Техника и физика высоких напряжений» 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры) в лекционных, лабораторных и практических занятиях при изучении дисциплии «Основы электротехнологий», «Высоковольтная силовая электропика» и подготовке аспирантов.

Декан электроэнергетического факультета, к.т.н., доцент

А.Ф. Сорокин

Заведующий кафедрой ВЭТФ, к.т.н., доцент

СА. Словесный

# Приложение З

## (обязательное)

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



# Приложение И (обязательное)

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

