

На правах рукописи



ТАНКОЙ Абель

**РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена на кафедре «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Соколов Александр Михайлович**

Официальные оппоненты:

Якименко Игорь Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроника и микропроцессорная техника» филиала ФГБУ ВО «НИУ«МЭИ» в г. Смоленске.

Чивенков Александр Иванович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 26.06.2020 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен <http://ispu.ru/node/12277>

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__»_____2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.064.02,
кандидат технических наук, доцент



Копылова Лариса Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшим направлением государственной политики Российской Федерации является глубокая модернизация экономики в целях значительного повышения энергоэффективности и конкурентоспособности промышленного производства. Современное промышленное производство характеризуется высокими темпами создания и применения принципиально новых технологических процессов и установок, обеспечивающих комплексный (технический, экономический и социальный) эффект. В области электротехники характерным примером является совершенствование известных и развитие новых электротехнологических процессов с применением электрических токов и напряжений непрямоугольной частоты (современные сварочные и лазерные установки, выполненные на основе полупроводниковых преобразователей напряжения; установки индукционного нагрева, устройства электротепловой (электротермической) обработки (ЭТО) бетонных и железобетонных изделий токами повышенной частоты (десятки килогерц и более), обработка пищевых, биологических и композиционных материалов переменными электромагнитными полями и т.д.).

Наиболее распространённым является электропитание технологических установок в пределах цехов по кабельным линиям напряжением 0,4 кВ. В случае электроснабжения технологических установок, использующих токи и напряжения повышенной частоты, возникает необходимость применения преобразователей напряжения и частоты на каждом технологическом посту (потребителе), общее количество которых на предприятии может достигать десятков и сотен единиц. Примером этого является цех для изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО, где попытка реализовать такую систему электропитания наталкивается ряд серьезных препятствий.

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 на основе применения новейших силовых высоковольтных полупроводниковых компонентов, прежде всего биполярных транзисторов с изолированным затвором (англ. IGBT). Параметры таких транзисторов достигли внушительных значений: рабочие токи до 2500 А, рабочее напряжение до 6000 В. Значительно снизилась потеря электроэнергии, повысилась скорость переключения, постоянно снижается стоимость, габариты, вес и т.д.

Силовой полупроводниковый преобразователь напряжения повышенной частоты, высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты, силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты и потребители специального назначения (например, объекты ЭТО железобетонных изделий) образуют локальный электротехнический комплекс повышенной частоты (ЭТКПЧ) для централизованного 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.

Объект исследования – локальный ЭТКПЧ, включающий в себя полупроводниковый преобразователь напряжения, высоковольтные кабельные линии повышенной частоты, силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты и потребители 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 компонентов и установившихся режимов работы ЭТКПЧ.

Цель работы – разработка высоковольтных промышленных систем электроснабжения повышенной частоты магистрального типа на основе дальнейшего развития и совершенствования методологии расчета и применения на практике таких устройств.

Задачи, решаемые в работе:

1. Разработка усовершенствованной методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ, основанной на применении частотного анализа, отличающейся от предыдущих разработок повышенной точностью и производительностью вычислений.

2. Формирование методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ, отличающейся тем, что позволяет выполнять такие расчеты для схем электроснабжения магистрального типа.

3. Разработка методики расчета погонной емкости высоковольтных кабельных двухпроводных линий повышенной частоты в металлическом экране, отличающейся тем, что позволяет учитывать наличие и параметры изоляции из твердого диэлектрика на поверхности токоведущих жил.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование характеристик ЭТКПЧ в виде высоковольтных систем электроснабжения магистрального типа, а также их элементов.

5. Разработка и исследование характеристик перспективных вариантов высоковольтных систем электроснабжения повышенной частоты магистрального типа, предназначенных для промышленного применения.

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 научной специальности объектами изучения 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 выполнены разработка и усовершенствование математической модели ЭТКПЧ и ее элементов, приведены теоретические и экспериментальные исследования таких установок, разработаны варианты ЭТКПЧ для применения в производственных условиях; **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 1–5; 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 3–5; 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 3–5; 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 3–5; 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 3–5.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выполнено усовершенствование (модернизация) методики электрического расчета характеристик установившегося режима работы ЭТКПЧ, основанной на использовании метода частотного анализа с разложением несинусоидальных сигналов в ряд Фурье; это

усовершенствование включает в себя более точное определение величины внутреннего сопротивления транзисторного преобразователя напряжения в зависимости от кратности гармоник разложения Фурье и замену численного интегрирования на применение набора аналитических выражений, полученных в настоящей работе, что позволило многократно снизить затраты времени на выполнение вычислений в среде MATLAB и повысить производительность научно-технических разработок.

2. Разработана методика электрического расчета характеристик ЭТКПЧ, выполненного в виде системы электроснабжения технологических установок магистрального типа, основанная на использовании принципов частотного анализа, с использованием усовершенствований по п.1

3. Разработана методика определения погонной емкости высоковольтной кабельной линии в виде двух проводников в твердой высоковольтной изоляции, расположенных в общем электромагнитном экране («полувоздушная изоляция»), основанная на использовании метода эквивалентных зарядов; методика является составной частью математической модели ЭТКПЧ.

Практическую значимость работы имеет следующее:

1. Предложенные расчетные методики, представляющие собой удобный и эффективный инструмент разработки и применения ЭТКПЧ в виде системы электроснабжения магистрального типа и позволяющие существенно экономить силы, средства и время при создании необходимого оборудования и выборе его режимов работы.

2. Впервые доказана возможность использования высоковольтных ЭТКПЧ для создания систем электроснабжения потребителей, коэффициент мощности которых существенно меньше единицы ($\cos\varphi \ll 1$), например установок индукционного нагрева.

3. Установлено, что системы электроснабжения магистрального типа по своим показателям и характеристикам не уступают системам электроснабжения радиального типа при меньшей стоимости и более высокой компактности. Оценка основных показателей и характеристик ЭТКПЧ в виде систем электроснабжения магистрального типа производственного назначения свидетельствует о целесообразности широкого применения таких устройств на практике.

4. Экспериментально доказано, что при использовании в составе ЭТКПЧ высоковольтных двухпроводных кабельных линий в электромагнитном экране не происходит увеличения потерь электроэнергии.

5. Показана целесообразность применения в составе ЭТКПЧ высоковольтных кабелей с воздушной изоляцией, как коаксиальной конструкции, так и в виде двухпроводного кабеля в общем электромагнитном экране в целях снижения реактивной (зарядной) мощности кабеля, что явилось основой для подготовки и подачи заявки на получение патента.

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.

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 и Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные теоретические разработки, представляющие собой удобный и эффективный инструмент создания и применения ЭТКПЧ в виде систем электроснабжения магистрального типа.

2. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований, доказывающие возможность и высокую эффективность ЭТКПЧ в виде систем электроснабжения магистрального типа, а также достоверность выполненных теоретических разработок.

3. Предложенные варианты и результаты оценки основных показателей и характеристик систем электроснабжения магистрального типа, выполненных на основе ЭТКПЧ, применительно к решению конкретных производственных задач, которые свидетельствуют о целесообразности широкого применения ЭТКПЧ на практике.

Достоверность и обоснованность результатов работы: обеспечиваются применением известных методов расчета электрических цепей, методов математического и статистического определения характеристик изоляции, использованием апробированных методов экспериментальных исследований, экспериментальных данных других авторов и данных, полученных в работе, совпадением расчётных и экспериментальных результатов.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались на Всероссийской конференции «Национальный конгресс по энергетике», на X, XI и XII Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (Иваново, 2015, 2016, 2017 гг.), XIX и XX Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («Бенардосовские чтения») (Иваново 2017 – 2019 г.), на двадцать третьей международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2017 гг.), на межвузовской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы» (ПОИСК 2016-2017-2018), ИВГПУ, Иваново.

Результаты исследований опубликованы в 24 работах, в том числе 22 статье, из них 7 – в научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, из них 3 – в (Scopus + ВАК), и 1 – в тезисах докладов в международной научно-технической конференции. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2018617603 и 1 Патент.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке методик расчета на основе частотного анализа и моделировании установленных 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 расчета наибольшего рабочего напряжения и передаваемой мощности высоковольтной кабельной электропередачи в составе ЭТКПЧ, разработке методики определения конструктивных параметров силовых трансформаторов и параметров их схем замещения, подготовке расчетных программ, апробации результатов исследования путем проведения натуральных экспериментов и подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы, приложения. Общий объём работы составляет 191 страницы, из которых основной текст – 156 страниц, список литературы – 18 страниц, приложения – 5 страниц. Список литературы состоит из 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, кратко определены и обоснованы цель, задачи и методы исследования, приведены сведения о научной новизне и практической ценности.

Глава 1 посвящена рассмотрению классификации, области применения, схемотехнических решений, технических показателей, технико-экономических характеристик, надежности, достоинств и недостатков различных вариантов практической реализации промышленных систем электроснабжения, применяемых в различных отраслях народного хозяйства. Отмечено, что широко применяемые в настоящее время системы электроснабжения промышленной частоты напряжением 0,6 кВ и ниже обладают рядом недостатков: например, доля потерь электроэнергии в них составляет 20 % и выше от общей величины потерь в электроэнергетике, хотя протяженность линий в таких системах не превышает сотен метров, необходимость и неудобство прокладки жгутов кабелей достаточно большого сечения и др. Показано, что особые трудности возникают при электроснабжении электротехнологических установок, в которых используются токи и напряжения повышенной частоты (5÷50 кГц): устройства индукционного нагрева, ди-

электрической сушки материалов, электротепловой (электротермической) обработки бетона при изготовлении железобетонных изделий и др., когда приходится на каждом технологическом посту устанавливать отдельный преобразователь напряжения, получающий питание от традиционной системы электроснабжения промышленной частоты. Количество преобразователей напряжения (т.е. технологических постов) в этом случае может достигать десятков и даже сотен единиц, что, соответственно, увеличивает стоимость основных фондов предприятий и создает значительные трудности в эксплуатации системы электроснабжения. Эти соображения в полной мере относятся к электротепловой обработке (ЭТО) железобетонных изделий токами повышенной частоты, которая обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционной тепловлажностной обработкой водяным паром (ТВО). Например, коэффициент полезного действия (КПД) для ЭТО может приближаться к 100 %, (ТВО – 10÷12 %. В итоге стоимость тепловой обработки бетона, т.е. самой большой составляющей стоимости технологического процесса (ее доля имеет величину 35÷45 %) снижается от 3 до 10 раз. ЭТО обладает гибкостью в управлении, удобством в применении, низкой стоимостью основных фондов, что делает ее весьма привлекательной для предприятий малого и среднего бизнеса, где традиционные методы тепловой обработки неудобны и невыгодны.

Выполненные в последние годы научно-технические разработки показали, что системы электроснабжения таких потребителей целесообразно выполнять в виде локальных высоковольтных электротехнических комплексов повышенной частоты (ЭТКПЧ). ЭТКПЧ содержит один полупроводниковый преобразователь напряжения на основе IGBT транзисторов большой мощности, получающий питание от трехфазной сети 50 Гц и преобразующий ее напряжение в однофазное напряжение повышенной частоты (10÷20 кГц) с несинусоидальным изменением во времени («трапеция с паузой»). Выходное напряжение преобразователя увеличивается до значения 1,1÷5 кВ с помощью повышающего высокочастотного силового трансформатора и подводится к потребителю электроэнергии с помощью высоковольтного кабеля, где с помощью понижающего трансформатора напряжение снижается до уровня, необходимого для нормальной работы электротехнологической установки. Вторичная обмотка этого трансформатора подключена к этой установке, например, к электродам опалубки для изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО токами повышенной частоты. Благодаря применению высокого напряжения и высокой частоты такая система электроснабжения имеет малые габариты, вес, стоимость и потери энергии. При этом могут применяться схемы электроснабжения как радиального, так и магистрального типа. К настоящему времени, благодаря выполненным теоретическим разработкам и экспериментальным исследованиям создана методологическая основа конструирования и исследования характеристик ЭТКПЧ средствами компьютерного моделирования, что необходимо для успешного применения таких устройств на практике. Например, с использованием принципов частотного анализа разработаны основы методики электрического расчета ЭТКПЧ в виде устройства электроснабжения радиального типа (рис. 1) при существенно нелинейном характере изменения во времени ЭДС источника в виде транзисторного преобразователя напряжения (рис. 2). ЭДС представляется в расчетах суммой гармоник посредством разложения в ряд Фурье.

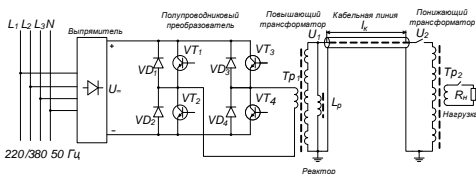


Рис. 1. Электрическая схема ЭТКПЧ: VT_1 – VT_4 , VD_1 – VD_4 – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя соответственно, Tr_1 , Tr_2 – повышающий и понижающий силовые трансформаторы, l_k – кабельная линия электропередачи, L_p – реактор

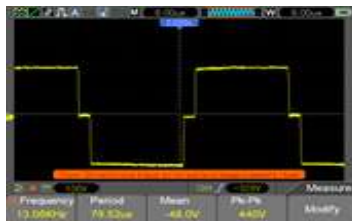


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма ЭДС транзисторного преобразователя напряжения

Однако в настоящий момент говорить о наличии полной и совершенной математической модели устройств такого типа преждевременно. Требуется дальнейшее развитие и совершенствование математического описания ЭТКПЧ. Эти соображения явились причиной выполнения настоящей работы, а анализ существующего положения дел в этой сфере знаний позволил сформулировать ее цели и задачи, приведенные выше.

Во второй главе приведены результаты теоретических разработок по развитию и совершенствованию математической модели локальных ЭТКПЧ, предназначенных для создания централизованного систем промышленного электроснабжения. При использовании предложенной ранее методики электрического расчета установившихся режимов ЭТКПЧ, основанной на применении принципов частотного анализа, результаты вычислений дают завышенные значения высокочастотных составляющих токов и напряжений, особенно в режиме XX. Это позволило выдвинуть предположение, что причиной такого результата является недостаточно точное представление зависимости внутреннего сопротивления транзисторов от частоты гармоник разложения Фурье. На основе детального анализа процесса диффузии неосновных носителей в базовой области известно, что угол сдвига (отставания) по фазе тока коллектора от тока эмиттера вследствие относительно медленного процесса диффузионного распространения неосновных носителей от эмиттерного перехода к коллекторному при частоте приложенного к транзистору переменного напряжения, равной граничной, составляет 60°. Это позволило внести изменение в формулу, описывающую зависимость внутреннего сопротивления транзистора в открытом состоянии от частоты, которая приобрела вид

$$Z_{ank} = Z_{an0} \sqrt{1 + \left(\frac{k f_1}{f_a} m \right)^2}, \quad (1) \quad \text{где} \quad Z_{en0} = 2 \frac{\Delta U_T}{I_{k0}} \quad (2)$$

– внутреннее сопротивление транзистора в открытом состоянии при постоянном напряжении, $k = 1, 3, 5, \dots$ кратность гармоники; f_1 – частота первой гармоники; f_a – предельная (граничная) частота усиления (паспортное значение); ΔU_T – падение напряжения на открытом транзисторе при постоянном токе I_{k0} (паспортные значения); $m = 1,73$ – постоянный коэффициент, величина которого соответствует отмеченному выше значению сдвига по фазе в 60°. В ранее предложенном выражении этот коэффициент отсутствовал ($m = 1$), что приводило к заниженной величине внутреннего сопротивления транзистора в открытом состоянии на высших гармониках.

Следующей задачей настоящей работы является модернизация важнейшей составной части методики электрического расчета ЭТКПЧ – процедуры определения амплитуды гармоник при разложении в ряд Фурье посредством интегрирования кривой ЭДС транзисторного преобразователя (кривая в виде «трапеция с паузой»). Она заключается в замене многократного численного интегрирования набором аналитических выражений, полученных в настоящей работе. Амплитуда гармоник при разложении кривой изменения во времени ЭДС источника (рис. 3) в ряд Фурье определяется посредством ее интегрирования в течение одного периода колебаний: $0 \div T$, с использованием формулы.

$$U_k = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T U(t) \cdot \sin(k \omega t) dt = 2U_m \cdot f_1 \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 + I_9), \quad (3)$$

где $I_1 \div I_9$ – значения интеграла, соответствующие одному из этих участков, отмеченных на рис. 3, полагая, что кривая ЭДС (рис. 1) представляет собой функцию, имеющую точки разрыва.

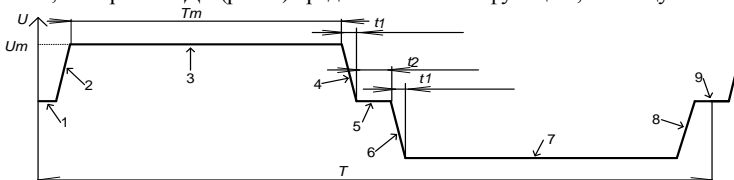


Рис. 3. Стилизованная осциллограмма и параметры ЭДС транзисторного преобразователя $U(t)$ «трапеция с паузой»; T_m – длительность амплитудного значения; $T = 2T_m + 2t_2 + 4t_1$; U_m – амплитудное значение ЭДС

Как следует из рис. 3, три слагаемые формулы (3) $I_1=I_5=I_9=0$. Для остальных составляющих, используя известные методы интегрирования математических функций, были получены аналитические выражения, например:

$$I_2 = \frac{2 \frac{t_2}{2} \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} \right)^2}{2} \right)}{(2\pi k f_1) \cdot t_1} - \frac{\sin \left[(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} \right) \right] + (2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} \right) \cdot \left(2 \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} \right)^2}{2} \right) - 1 \right)}{(2\pi k f_1)^2 \cdot t_1} + \frac{\sin \left((2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right) \right) + (2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right) \cdot \left(2 \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right)^2}{2} \right) - 1 \right)}{(2\pi k f_1)^2 \cdot t_1}, \quad (4)$$

Полученные выражения позволяют при определении амплитуды гармоник ЭДС с помощью формулы (3) полностью отказаться от процедуры численного интегрирования, многократно ускорить вычисления и повысить их точность.

В работе решена еще одна задача – разработана методика расчета электрических характеристик системы электроснабжения магистрального типа. На рис. 4. представлена схема ЭТКПЧ магистрального типа в общем случае, когда она содержит n электроприемников, которые, кроме последнего (n -го), подключены к промежуточным точкам высоковольтной кабельной линии.

На основании электрической схемы установки рис. 4 составлена схема замещения, которая приведена на рис. 5, где участки магистральной кабельной линии, рассматриваются, как элементы с распределенными параметрами, для математического описания которых используются уравнения длинной линии.

Для выполнения электрических расчетов по схеме рис. 5 целесообразно использовать простой и наглядный прием, который был применен для расчета ЭТКПЧ радиального типа – последовательное свертывание схемы, перемещаясь от конца линии, начиная с конечной точки n к источнику, с последующим развертыванием в обратном направлении.

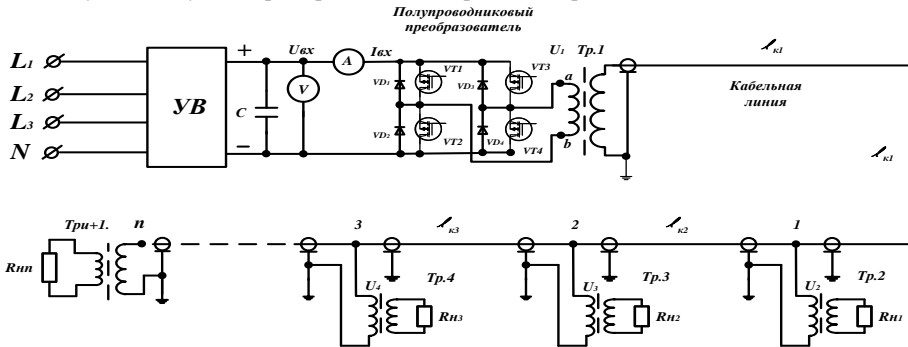


Рис. 4. Электрическая схема ЭТКПЧ в виде системы электроснабжения магистрального типа: УВ – трехфазный управляемый выпрямитель напряжения питающей сети 50 Гц; VT_{1-4} – силовые IGBT транзисторы; $Tr.1$ – повышающий высоковольтный высокочастотный силовой трансформатор; $Tr.2 \div Tr.n+1$ – силовые высокочастотные понижающие трансформаторы; $R_{n1} \div R_{n,n+1}$ – сопротивление нагрузки

Расчет токов и напряжений выполняется по каждой гармонике разложения ЭДС (рис. 2,3) в ряд Фурье U_k и результаты этих вычислений суммируются в каждой точке электрической цепи. В итоге определяются мгновенные значения и характер изменения во времени токов, напряжений во всех точках схемы замещения (рис. 5), величина активной, реактивной и полной мощности во всех элементах схемы, КПД как отдельных составных частей, так и ЭТКПЧ в целом.

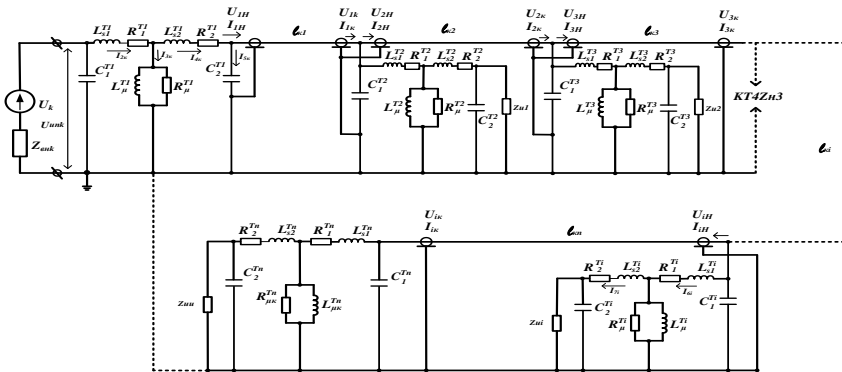


Рис. 5. Схема замещения высоковольтного ЭТКПЧ магистрального типа при произвольном количестве электроприемников (рис. 4)

Еще одной задачей теоретических разработок является создание инженерной расчетной методики, позволяющей определять значение погонной емкости двухпроводных кабелей с твердой изоляцией жил, расположенных в электромагнитном экране (оплетка, труба, короб), т.е. с «полувоздушной» изоляцией (рис. 6). В отношении двухпроводных линий этот параметр может быть определен посредством решения системы потенциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2 \\ U_2 = \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2 \end{cases} \quad (5) \quad \text{где } \alpha_{11} = \alpha_{22} - \text{собственные потенциальные коэффициенты, } \alpha_{12} = \alpha_{21} - \text{взаимные потенциальные коэффициенты, } q_1 = q_2 - \text{погонный заряд на проводниках, а напряжение на втором проводнике можно выразить через напряжение на первом:}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \cos \psi, \quad (6) \quad \text{где } \psi - \text{угол сдвига по фазе между напряжениями } U_1 \text{ и } U_2$$

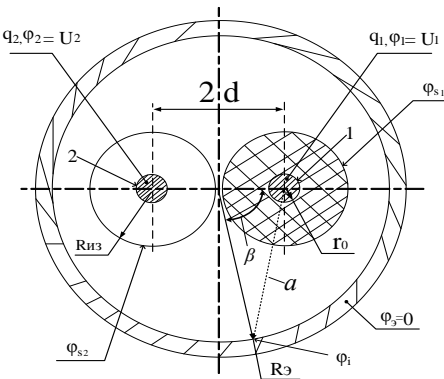


Рис. 6. Иллюстрация методики расчета погонной электрической емкости двухпроводной кабельной линии в экране

Можно предположить, что связанные электрические заряды на поверхности твердой изоляции каждого проводника, возникающие вследствие поляризации диэлектрика, равномерно распределены по этой поверхности. Одновременно предполагается, что кабельная линия является бесконечно длинной. Посредством применения формулы Остроградского-Гаусса для случая протяженного проводника, позволяющей определять напряженность электрического поля в любой точке пространства, были получены следующие выражения для определения собственных потенциальных коэффициентов:

может плавно регулироваться в пределах от 0 до π с помощью системы управления, входящей в состав полупроводникового преобразователя напряжения.

В результате решения системы уравнений (5) могут быть получены выражения для определения фазной емкости C_1, C_2 :

$$C_0 = C_1 = C_2 = \frac{q_1}{U_1} = \frac{q_2}{U_2} = \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12} \cos \psi}{\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2} \quad (7)$$

Таким образом, для вычисления емкостей необходимо знание потенциальных коэффициентов.

Для инженерных расчетов потенциальные коэффициенты могут быть вычислены с применением метода эквивалентных зарядов.

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \frac{R_{uz}}{r_0} + \frac{\epsilon_{r0}}{\pi} \int_{\beta=0}^{\pi} \ln \sqrt{\frac{(R_3 \cdot \sin \beta)^2 + (d - R_3 \cdot \cos \beta)^2}{R_{uz}}} d\beta \right) \quad (8)$$

и взаимных потенциальных коэффициентов:

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{11} \frac{1}{\left(\alpha_{11} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r0}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} \right)} \left(\alpha_{11} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r0}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2d}{R_{uz}} \right). \quad (9)$$

где ϵ_0 и ϵ_{r0} – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика токоведущих жил, геометрические параметры – согласно рис. 6. Для расчета значения погонной индуктивности кабеля L_0 применяются известные из литературных источников формулы, а затем определяется величина волнового сопротивления кабеля: $Z = \sqrt{(L_0/C_0)}$. Таким образом, становятся известны все основные параметры высоковольтной кабельной линии, знание которых необходимо для электрического расчета установившихся режимов работы электротехнического комплекса.

В третьей главе показано, как предложенные в настоящей работе теоретические разработки (гл. 2) позволяют выполнять исследования различных характеристик высоковольтных ЭТКПЧ, предназначенных для создания систем промышленного электроснабжения, а также их отдельных элементов в целях разработки рекомендаций по рациональному устройству и режимам работы таких установок. При использовании ЭТКПЧ желательно снижать величину погонной емкости кабеля в целях уменьшения реактивной (зарядной) мощности кабельной линии в установившихся режимах работы, которая имеет высокие значения из-за повышенной частоты рабочего напряжения.

Поскольку волновые и погонные параметры радиочастотных коаксиальных высоковольтных кабелей, которые обычно применяются в составе ЭТКПЧ, хорошо известны, интерес представляют сведения о показателях двухпроводных кабелей в общем экране, а также коаксиальных и двухпроводных кабелей с воздушной (газовой) изоляцией. Представленная в работе методика расчетного определения параметров двухпроводных кабельных линий в виде двух изолированных проводников в одном общем экране (рис. 6) позволила исследовать влияние различных факторов на эти параметры. Установлено, что имеет место существенное влияние радиуса экрана, радиуса изоляции и угла сдвига по фазе ψ между напряжениями U_1 и U_2 (рис. 6) на величину погонной емкости кабеля. Для примера на рис. 7 представлены расчетные зависимости погонной емкости от ψ , полученные с помощью соотношения (7), которые показывают, что при определенных условиях наблюдается более чем 4-х кратное изменение емкости при изменении ψ в пределах $0-\pi$.

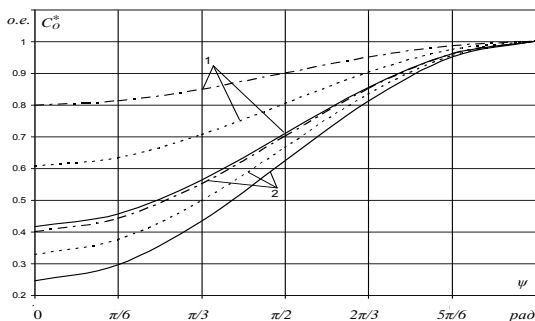


Рис. 7. Зависимости относительного значения погонной емкости двухпроводной кабельной линии (рис. 6) от угла сдвига по фазе между напряжениями разных фаз (проводах) при различных значениях радиуса экрана и радиуса изоляции: 1 – $R_3=10$ мм; 2 – $R_3=30$ мм; сплошные линии – $R_{ИЗ}=2$ мм; пунктирные линии – $R_{ИЗ}=2$ мм; штрихпунктирные линии – $R_{ИЗ}=4$ мм; $r_0=0,75$ мм.

Кроме этого, погонная емкость двухпроводных кабелей с твердой изоляцией токоведущих жил в $1,8\div 3$ раза меньше аналогичного показателя радиочастотных коаксиальных кабе-

лей. Расчеты также показали, что достичь наименьшего значения погонной емкости можно применением кабелей с воздушной изоляцией, имеющей минимальное значение относительной диэлектрической проницаемости.

Результаты расчетов свидетельствуют о возможности управления величиной погонной емкости и волнового сопротивления таких кабельных линий в целях оптимизации конструкции и режимов работы высоковольтных электротехнических комплексов повышенной частоты, в составе которых эти кабельные линии используются.

Вычисления с использованием формулы (1) при $m = 1,73$ показали лучшее согласование с результатами ранее выполненных экспериментальных исследований по различным параметрам: величина напряжения, активной мощности, КПД, осциллограммы напряжений и токов и др. Таким образом, использование выражения (1) позволяет повысить точность вычислений.

Установлено также, что применение аналитических выражений вида (4) позволило при выполнении вычислений по формуле (3) отказаться от использования многократного численного интегрирования. Это многократно уменьшило затраты времени на вычисления (с нескольких часов до нескольких минут), т.е. значительно повысило производительность расчетных работ и точность расчетов.

Теоретические исследования с использованием предложенной в настоящей работе методики электрического расчета ЭТКПЧ в виде магистральной линии электроснабжения показали, что такие системы электроснабжения по своим эксплуатационным показателям не уступают системам радиального типа. Они отличаются высокой стабильностью рабочего напряжения у потребителя электроэнергии, а КПД ЭТКПЧ применительно к лабораторному действующему макету мощностью 4,5 кВт достигает величины 98,8 % при использовании в составе установки двухпроводного кабеля с «полувоздушной» изоляцией. Также выполнено исследование спектрального состава напряжений, тока и активной мощности при работе такой линии на активную нагрузку. Установлено, например, что не менее 83% мощности передаются первой гармоникой, остальные 17% передаются благодаря остальным высшим гармоникам. При использовании в вычислениях первых 30 гармоник величина активной мощности определяется с точностью 0,0001%.

В случае если потребители системы электроснабжения представляют собой реактивную нагрузку (активно-индуктивную), условия работы ЭТКПЧ заметно усложняются. Тем не менее, установка имеет приемлемые показатели для практического применения.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на лабораторных макетах, и оценка характеристик вариантов промышленного применения ЭТКПЧ. Вполне очевидно, что доверять результатам теоретических оценок (гл. 3) можно лишь при условии достоверности выполненных теоретических разработок (гл. 2), которая может быть подтверждена посредством экспериментов. Кроме этого, эксперимент является источником дополнительных сведений, необходимых для успешного применения теоретических разработок.

В целях проверки предложенной методики расчета параметров высоковольтной кабельной линии (рис. 6) были выполнено сравнение расчетных и опытных значений погонных параметров двухпроводных кабелей различной конструкции. Причем опытные значения получены на основании измерения полных значений индуктивности и емкости отрезков кабеля конечной длины с помощью прибора типа APPA RLC 703 с последующим делением результатов измерения на длину кабеля. Анализ этих результатов позволяет сделать вывод, что для значений погонной емкости наблюдается хорошее согласование расчетных и опытных величин, учитывая возможное отклонение фактической относительной диэлектрической проницаемости ϵ_{r0} относительно усредненных значений, использованных в расчетах. Однако в отношении погонной индуктивности, вычисление которой производилось с использованием формул, взятых из литературных источников, расхождение между расчетными и опытными величинами может превышать двукратное значение.

Методика расчета электрических цепей с питанием от мощных преобразователей и усовершенствованная в настоящей работе (гл. 2), предполагает знание граничной

частоты IGBT транзисторов или модулей f_a , необходимое для точного расчета внутреннего сопротивления транзисторного преобразователя напряжения (2). В настоящее время не существует математической модели, позволяющей определять значение f_a посредством расчета. Поэтому выполнены опыты по исследованию частотных характеристик IGBT модулей типа IRG7PH42UD и IRG4PSH71UD с помощью экспериментальной установки, которая представляет собой каскад усиления, собранный на одном IGBT транзисторе по схеме с общим коллектором. В результате эксперимента получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) IGBT транзисторов, а по ним – значение граничной частоты из условия уменьшения коэффициента усиления в $\sqrt{2}$ раз. Как оказалось, в обоих случаях f_a имеет приблизительно одинаковую величину – около 80 кГц, которая использовалась во всех расчетах, представленных в настоящей работе.

Для подтверждения эффективности двухпроводных кабелей с «полувоздушной» изоляцией был выполнен эксперимент, электрическая схема которого показана на рис. 8. Результаты такого эксперимента представлены на рис. 9.

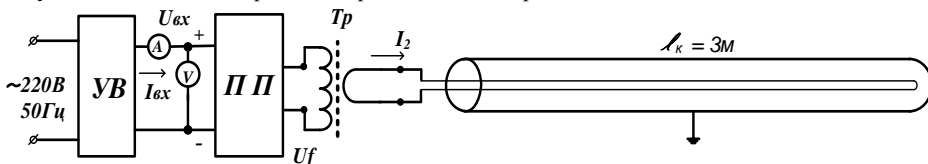


Рис. 8. Электрическая схема опыта по определению влияния электромагнитного экрана на величину потерь электроэнергии (мощности) в двухпроводной кабельной линии повышенной частоты

Экспериментальные значения, полученные для различных условий, можно представить одной общей зависимостью. Это позволяет сделать вывод об отсутствии ощутимого влияния наличия и вида экрана на величину потерь в 2-х проводной экранированной линии, что подтверждает теоретические соображения.

В целях опытной проверки достоверности предложенной в настоящей работе методики электрического расчета ЭТКПЧ в виде магистральной линии электроснабжения повышенной частоты, а также других теоретических методик (гл. 2) были выполнены разработка, изготовление элементов, сборка и наладка экспериментальной установки.

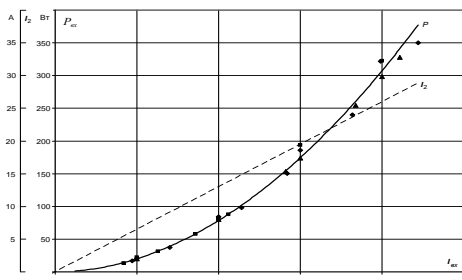


Рис. 9. Зависимость мощности на входе в полупроводниковый преобразователь (ПП) P , величины тока на выходе силового трансформатора i_2 (рис. 8) от величины тока на входе ПП: \blacklozenge – без экрана (на воздухе); \blacktriangle – в стальной трубе; \blacksquare – в алюминиевом экране

(паралон, пенопласт). Такая конструкция ЭТКПЧ необходима для того, чтобы, наряду с регистрацией и измерением электрических параметров, определять показатели её энергетической эффективности с использованием калориметрического метода. На рис. 12 представлены характерные опытные и расчетные осциллограммы напряжения и тока в различных точках экспериментальной установки, которые свидетельствуют о достаточно хорошем согласовании опытных и расчетных осциллограмм, лишь в кривой

Было изготовлено несколько вариантов преобразователя напряжения различной мощности. Внешний вид одного из преобразователей напряжения представлен на рис. 10. Упрощенная электрическая схема одного из экспериментов представлена на рис. 11. Особенностью этой схемы является то, что нагрузка представляет собой электрические водонагреватели, погруженные в емкость, заполненную водой, на поверхности которой установлена теплоизоляция

напряжений на нагрузке расчет демонстрирует большую величину высокочастотной составляющей.



Рис. 10. Внешний вид транзисторного преобразователя напряжения мощностью 7 кВт

Это можно объяснить тем, что применяемая в методике традиционная Т-образная схема замещения трансформатора не в полной мере отражает особенности силовых высокочастотных трансформаторов. По-видимому, задача адекватного представления таких элементов в схемах замещения ЭТКПЧ является темой дальнейших научно-технических разработок. По результатам расчетов и экспериментов выполнено сравнение опытных и теоретических значений КПД установки и мощности, пере-

даваемой в нагрузку P_{H2} , которое графически представлено на рис. 13 и демонстрирует согласование расчетных и опытных значений. Это полностью подтверждает достоверность предложенной расчетной методики (гл. 2) и свидетельствуют о высоких эксплуатационных показателях магистральной системы электроснабжения. В целях определения возможности применения высоковольтного ЭТКПЧ для электропитания установок индукционного нагрева (например, железобетонных изделий в стальной опалубке) и предварительной оценки показателей такого устройства были выполнены эксперименты с использованием лабораторной установки (рис. 11), у которой в качестве нагрузки использовались индукторы в виде плоской катушки диаметром 22 см с числом витков – 22, установленные на стальной греющей поверхности.

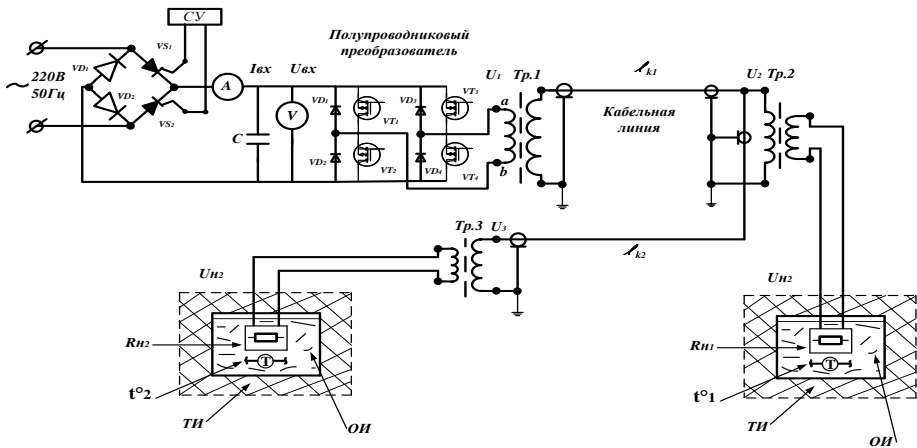


Рис. 11. Схема экспериментальной установки при исследовании режимов работы ЭТКПЧ магистрального типа

Эти эксперименты доказали, что системы электроснабжения на основе ЭТКПЧ пригодны для электропитания потребителей с ярко выраженной реактивной (индуктивной) нагрузкой. Хотя в этом случае наблюдается некоторое снижение показателей энергетической эффективности, она остается на достаточно высоком уровне.

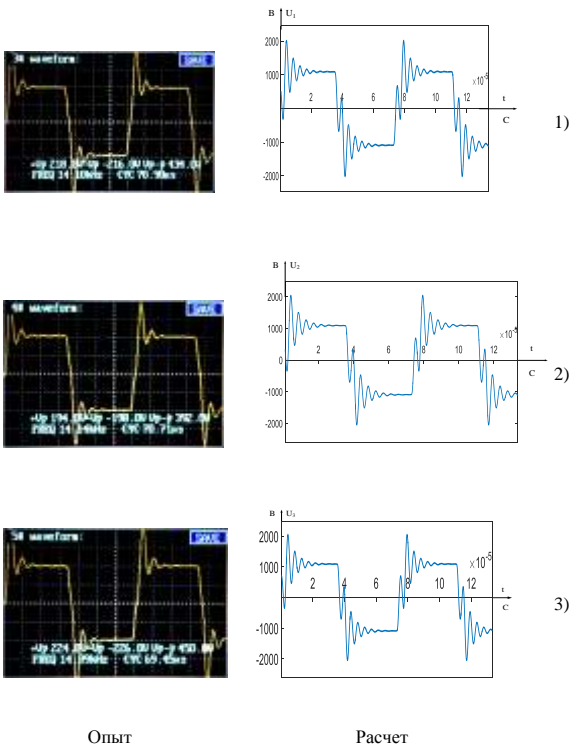
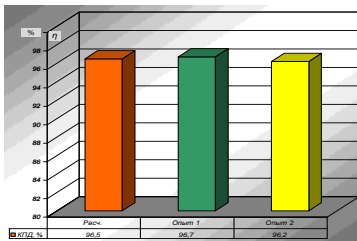


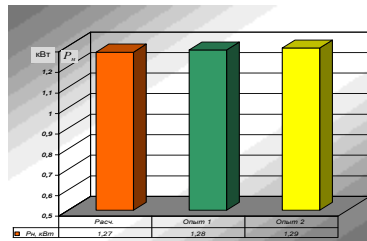
Рис. 12. Опытные и расчетные осциллограммы напряжения при номинальной мощности нагрузки $P_{ном1} = 1$ кВт и $P_{ном2} = 1,2$ кВт: 1 – высокое напряжение в начале кабельной линии (измерение через делитель 1/10); 2 – высокое напряжение в промежуточной точке (измерение через делитель 1/10); 3 – высокое напряжение в конце кабельной линии (измерение через делитель 1/10); масштаб по горизонтали для опытных осциллограмм – 10 мкс/дел; коэффициенты трансформации имеют величину $K_{Тр1} = K_{Тр3} = 5$, $K_{Тр2} = 10$

С помощью предложенных расчетных методик выполнено исследование характеристик двух вариантов высоковольтных ЭТКПЧ магистрального типа, пригодных для промышленного применения: 1) – установка для изготовления с помощью электротепловой обработки токами повышенной частоты железобетонных фундаментных блоков; 2) – установка для изготовления железобетонных шахт дымоудаления типа ШДЦ 12 крупнопанельных зданий; в обоих случаях номинальная мощность установок

составляет 30 кВт, номинальное напряжение кабельной линии – 2,5 кВ, рабочая частота напряжения – 13 кГц. КПД установок при длине участков кабельной линии в 40 м в первом случае имеет величину порядка $97 \div 98,5$ %, во втором $95 \div 97,5$ %.



КПД



Активная мощность в нагрузке

Рис. 13. Сравнение опытных и расчетных значений КПД ЭТКПЧ и мощности, передаваемой в нагрузку: опыт 1 – $P_{ном1} = 1$ кВт и $P_{ном2} = 1,2$ кВт; опыт 2 – $P_{ном1} = 0$ кВт и $P_{ном2} = 2,2$ кВт

Для примера на рис. 14 представлена электрическая схема установки по варианту 1. Для изготовления преобразователя напряжения установки как в первом (рис. 14), так и во втором варианте предполагается использовать IGBT модуль типа CM300DU-24NFH 2IGBT 1200 (300A 50KHz NFH-series), в конструкции транзисторного преобразователя используется два таких модуля. С помощью разработанного в настоящей работе программно-алгоритмического обеспечения было выполнено исследование характеристик и показателей установившегося режима работы таких установок. Для

примера на рис. 15 представлена зависимость важнейшего показателя установки – КПД от различных факторов.

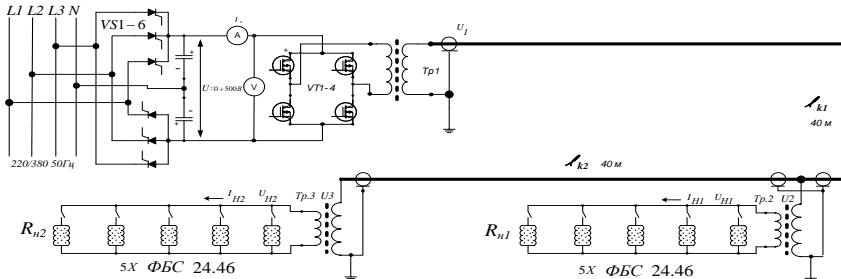


Рис. 14. Магистральная схема промышленного электроснабжения установок для изготовления железобетонных изделий (фундаментных блоков) с помощью электротепловой обработки токами повышенной частоты, выполненная на основе ЭТКПЧ

Установлено, что с увеличением l_{k1} и l_{k2} может наблюдаться слабое увеличение P_{H1} , которое можно объяснить влиянием емкостного эффекта, и некоторое снижение η , вызванное увеличением потерь энергии в кабельной линии. При работе ЭТКПЧ с минимальной нагрузкой ($n_{об1} = n_{об2} = 1$) снижение его КПД (η) с увеличением длины линии оказывается более ощутимым по сравнению с режимом максимальной нагрузки ($n_{об1} = n_{об2} = 5$). Поэтому на практике целесообразно по возможности избегать длительной работы такой установки в режиме минимальных нагрузок при длине участков кабельной линии свыше 150 м. Расчеты показали также, что мощность, передаваемая в нагрузку, как в конце линии, так и в точке отбора (промежуточной) имеет практически одинаковую величину независимо от длины кабельной линии.

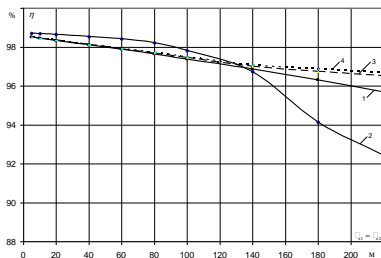


Рис. 15. Зависимости КПД ЭТКПЧ от длины участков магистральной кабельной линии: 1 – зависимости при максимальной нагрузке ($n_{об1} = n_{об2} = 5$) и при использовании кабеля РК-75; 2 – зависимости при минимальной нагрузке ($n_{об1} = n_{об2} = 1$), кабель РК-75); 3 – зависимости для $n_{об1} = n_{об2} = 5$ при использовании двухпроводного кабеля с твердой изоляцией токоведущих жил в общем экране ($Z=140$ Ом, $C_0=50$ пФ/м); 4 – зависимости для $n_{об1} = n_{об2} = 5$ при использовании двухпроводного кабеля в общем экране с воздушной изоляцией ($Z=250$ Ом, $C_0=1$ пФ/м)

Были получены также расчетные осциллограммы напряжений и токов в различных точках установки, которые показали практически полное отсутствие в них высокочастотных составляющих по сравнению с результатами, полученными на лабораторных макетах. Это можно объяснить малой величиной сопротивления нагрузки, что приводит к демпфированию высокочастотных составляющих.

Основные результаты работы

1. Проведено усовершенствование методики электрического расчета характеристик и показателей установившихся режимов работы ЭТКПЧ в виде системы промышленного электроснабжения, основанной на использовании принципов частотного анализа: а) получено уточненное выражение для определения величины внутреннего сопротивления полностью открытого транзистора в зависимости от частоты гармоник разложения кривой ЭДС преобразователя напряжения; б) получено аналитическое выражение для вычисления интеграла разложения Фурье при определении амплитуды гармоник, входящих в состав кривой ЭДС, что позволяет отказаться от численного интегрирования при осуществлении расчетов; в) экспериментальным способом определено численное значение важного параметра расчетной методики – граничной частоты IGBT транзисторов (80

кГц). Это позволило повысить точность вычислений различных характеристик, а длительность вычислений, составлявшая 8 и более часов, снизилась до нескольких минут.

2. Решена задача по разработке методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ в виде системы промышленного электроснабжения магистрального типа с питанием ее от транзисторного преобразователя большой мощности. При разработке этой методики были использованы результаты усовершенствования, указанные в п.1. Выполнена программно-алгоритмическая реализация предложенной методики в среде MATLAB.

3. Разработана методика определения параметров (C_0 , L_0 , Z) двухпроводной кабельной линии в виде двух отдельных проводников с твердой изоляцией в общем металлическом экране («полувоздушная» изоляция). Такой кабель является перспективным типом линии для использования в системах электроснабжения повышенной частоты, т.к. обладает более низкой погонной емкостью и реактивной (зарядной) мощностью на повышенных частотах по сравнению с коаксиальными кабелями, кроме этого, такие кабели позволяют создавать управляемые электропередачи повышенной частоты.

4. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования характеристик установившегося режима работы ЭТКПЧ в виде высоковольтной магистральной системы электроснабжения повышенной частоты с применением лабораторного макета показали, что магистральные системы электроснабжения по своим эксплуатационным показателям не уступают системам радиального типа. Установлено хорошее согласование теоретических оценок и результатов эксперимента, подтверждающее достоверность выполненных теоретических разработок. Подтверждена также возможность применения ЭТКПЧ для электроснабжения потребителей с ярко выраженной реактивной (индуктивно-активной) нагрузкой. Доказано отсутствие влияния наличия и вида материала металлического экрана двухпроводного кабеля на величину его погонной индуктивности и мощности потерь при использовании таких кабелей в составе ЭТКПЧ.

5. По результатам работы предложено два варианта высоковольтных ЭТКПЧ магистрального типа, пригодных для промышленного применения. Это установка для изготовления с помощью электротепловой обработки токами повышенной частоты железобетонных фундаментных блоков и установка для изготовления железобетонных шахт дымоудаления типа ШДЦ 12 крупнопанельных зданий. В обоих случаях номинальная мощность установок составляет 30 кВт, номинальное напряжение кабельной линии – 2,5 кВ, рабочая частота напряжения – 13 кГц. Исследование характеристик установившихся режимов работы таких установок подтвердили их высокие эксплуатационные показатели, например, КПД установок при длине участков кабельной линии в 40 м имеет величину не ниже 95÷97 %.

ПОЛНОТА ИЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДИССЕРТАЦИИ В РАБОТАХ, ОПУБЛИКОВАННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. **Танкой А.** Лабораторная установка для экспериментальных исследований тепловой обработки материалов и изделий токами повышенной частоты / А. Танкой, С.В. Федосов, А.М. Соколов, Н.В. Красносельских, А.Н. Кузнецов, Д.В. Лакеев // *Технология текстильной промышленности.* №3. 2017. С.241–245 (*Индексировано в базе данных Scopus*).

2. **Танкой А.** Показатели энергетической эффективности высоковольтного электротехнического комплекса повышенной частоты / А. Танкой, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Т.Е. Шадриков, А.Д. Бачурина, А.М. Соколов // *Энергетик.* №7. 2017. С.6–12.

3. **Танкой А.** Спектральный анализ установившихся режимов работы электропередачи повышенной частоты / А.Танкой, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // *Электричество* №2. 2018. С.17–26.

4. **Танкой А.** Численно-аналитический расчет температурных характеристик высоковольтного кабеля с повышенной частотой рабочего напряжения в условиях текстильного предприятия / С.В. Федосов, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Т.Е. Шадриков, А. Танкой // *Технология текстильной промышленности.* №2. (374)–2018. С.186-194 (*Индексировано в базе данных Scopus*).

5. **Танкой А.** Повышение точности и сокращение времени расчета установившихся режимов электротехнических комплексов повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков, А. Танкой, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов // Вестник ИГЭУ. Вып. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. 2019. С.22–31.

6. **Танкой А.** Исследование характеристик двухпроводных высоковольтных кабелей для электротехнических комплексов повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А. Танкой, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, А.А. Дьячков, В.Д. Лебедев // Электротехника. №8. 2019. С.53–59.

7. **Танкой А.** A study of the characteristics of two-wire high-voltage cables for increased-frequency electrical systems / A.V. Gusenkov, V.D. Lebedev, A.M. Sokolov, T.E. Shadrikov, A. Tankoy, A.A. Dyachkov // Russian Electrical Engineering. №8. 2019. Том 90. С.599–605 (*Индексировано в базе данных Scopus*).

Публикации в других изданиях

8. **Танкой А.** La centrale hydroélectrique d'imboulou (république du Congo-Brazzaville) (*ГЭС Имбулу (Республика Конго-Браззавиль)*) / А. Tankoy, doctorant, Е.А. Gudkova directrice // Проблемы социальных и гуманитарных наук, десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных (Энергия-2015) Иваново. 21–23 апреля Т7. С.235–236.

9. **Танкой А.** Диагностика кабельной изоляции локационным методом / А. Танкой, А.С. Новикова, А.Ю. Соболев // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново. «Энергия–2016». С.276–277.

10. **Танкой А.** Исследование формы выходного напряжения полупроводникового преобразователя в локальной высоковольтной электропередаче повышенной частоты / А. Танкой, Т.Е. Шадриков // «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» (ПОИСК-2016): межвузовская научно-техническая конференция аспирантов и студентов с международным участием. Иваново. 2016. Часть 2. С.300–302.

11. **Танкой А.** La recherche d'une forme de tension à la sortie d'un convertisseur à semi-conducteur dans un réseau local haute tension de haute fréquence / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А. Танкой // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: материалы конференции. В7 т. Т3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2017. С.291–292.

12. **Танкой А.** Оценка методики расчета кабельной линии электропередач повышенной частоты с промежуточным отбором мощности / А. Танкой асп, А.Д. Бачурина, А.А. Дьячков студенты, Т.Е. Шадриков ст. преп, А.М. Соколов д.т.н. доц. // Двадцать третья международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "радиоэлектроника, электротехника и энергетика" Москва, 02-03 марта 2017 г. С.309. Т3.

13. **Танкой А.** К вопросу о математическом моделировании электротехнических комплексов повышенной частоты при электроснабжении потребителей с индуктивной нагрузкой / А. Танкой, Т.Е. Шадриков, А.Д. Бачурина, А.А. Дьячков // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения) ИГЭУ. 2017. Т1. С.89 – 92.

14. **Танкой А.** Об оценке стоимостных показателей высоковольтных электротехнических комплексов повышенной частоты для систем промышленного электропитания / А. Танкой, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения) ИГЭУ. 2017. Т1. С.93 – 96.

15. **Танкой А.** Методика оценки предельно допустимой длины кабельной линии повышенной частоты / А. Танкой, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // (ПОИСК - 2017) Межвузовская (с международным участием) молодежная научно-техническая конференция «Молодые ученые-развитию текстильно-промышленного кластера». ИВГПУ. 2017. Т2.–С.266–267.

16. **Танкой А.** Разработка методики экспериментального исследования температурных характеристик индукционного нагрева плоской стальной поверхности / А. Танкой, А.М. Соколов, Н.В. Красносельских, Д.В. Лакеев // (ПОИСК - 2017) Межвузовская (с международным участием) молодежная научно-техническая конференция «Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера» ИВГПУ. 2017. Т2. С.269 – 271.

17. **Танкой А.** Определение частотных характеристик мощных IGBT транзисторов / А. Танкой, Д.В. Лакеев // (ПОИСК - 2017) Межвузовская (с международным участием) молодежная научно-

техническая конференция «Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера». ИВГПУ – 2017. – Т2. Часть 2. С.271 – 273.

18. **Танкой А.** Оценка влияния характеристик намагничивания ферритового магнитопровода на параметры силового трансформатора повышенной частоты/ А. Танкой, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков, А.А. Дьячков // (ПОИСК - 2018). Межвузовская (с международным участием) молодёжная научно-техническая конференция 24 – 27 апреля 2018 г «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы». С.143.

19. **Танкой А.** Совершенствование расчетных методик электротехнических комплексов повышенной частоты на основе полупроводниковых компонентов / А. Танкой, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // (ПОИСК - 2018). Межвузовская (с международным участием) молодёжная научно-техническая конференция 24 – 27 апреля 2018 г «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы». С.143–145.

20. **Танкой А.** Оценка параметров энергоэффективной установки для электротепловой обработки тонкостенного железобетонного изделия индукционным методом / А. Танкой, А.М. Соколов, Н.В. Красносельских, В.А. Котов // (ПОИСК - 2018) Межвузовская (с международным участием) молодёжная научно-техническая конференция 24–27.04.2018 г «Молодые ученые–развитию национальной технологической инициативы». С.324– 325.

21. **Танкой А.** Особенности установившихся режимов работы электротехнического комплекса повышенной частоты в виде линии электроснабжения магистрального типа / Т.Е. Шадриков, А. Танкой, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, А.А. Дьячков, В.Д. Лебедев // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XX Бенардосовские чтения) ИГЭУ. – 2019. Т1. С.63–66.

22. **Танкой А.** Влияние параметров высоковольтной кабельной линии на режимы работы электропередачи с нетрадиционными параметрами переменных токов и напряжений / Т.Е. Шадриков, А. Танкой, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, А.А. Дьячков, В.Д. Лебедев // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XX Бенардосовские чтения) ИГЭУ. 2019. Т1. С.67–70.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

23. **Танкой А.** Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2018617603 «Расчет магистральной электропередачи повышенной частоты». Авторы: А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков, А. Танкой // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 26.06.2018 г.

Патент

24. **Танкой А.** Патент на изобретение №2676470 «Высоковольтный кабель». Авторы: Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А. Танкой // Приоритет изобретения: 16 ноября 2017 года. Дата регистрации 29 декабря 2018 года. Срок действия: 16 ноября 2037 года. Территория: Российская Федерация.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1–24] – участие в разработке методов расчета и математических моделей, проведении вычислительных экспериментов на полученных моделях, анализе и оценке полученных результатов, получении аналитических решений отдельных задач исследования, проведении экспериментальных исследований, [3–7, 13–14,20,22,24] – разработка программ расчета.

Автор выражает благодарность старшим коллегам: Алексею Васильевичу Гусенкову, Владимиру Дмитриевичу Лебедеву и Тимофею Евгеньевичу Шадрикову за консультации и совместные обсуждения наиболее важных вопросов при работе над диссертацией.

ТАНКОЙ Абель

РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 22.04.2020 Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ