

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
(ИГЭУ)

На правах рукописи



Танкой Абель

**Разработка локальной высоковольтной
промышленной системы электроснабжения
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 – 2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	14
1.1. Существующие технические решения в сфере систем промышленного электроснабжения.....	14
1.2. Перспективные направления научно-технического прогресса в области систем электроснабжения промышленных предприятий....	20
1.3. Математическое и физическое моделирование устройств промышленного электроснабжения на основе полупроводниковой преобразовательной техники.....	26
1.4. Выводы. Цель и задачи исследования.....	38
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ.....	41
2.1. Модернизация методики электрического расчета установившихся режимов работы на основе частотного анализа.....	42
2.2. Разработка методики электрического расчета установившихся режимов магистральной схемы электроснабжения повышенной частоты.....	51
2.3. Методика расчета параметров высоковольтных кабельных линий повышенной частоты.....	65
2.4. Выводы.....	74
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ.....	76
3.1. Параметры кабельных линий повышенной частоты различной конструкции.....	76

3.2. Результаты усовершенствования (модернизации) методики электрического расчета установившихся режимов работы устройств электроснабжения повышенной частоты.....	84
3.3. Исследование спектральных характеристик токов, напряжений и мощности в системе электроснабжения повышенной частоты.....	89
3.4. Режимы работы и параметры высоковольтной магистральной схемы электроснабжения повышенной частоты.....	102
3.5. Особенности работы схемы электроснабжения при наличии реактивной нагрузки.....	109
3.6. Выводы по гл.3.....	113
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИАНТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭТКПЧ.....	116
4.1. Исследование параметров кабельных линий и характеристик силовых электронных компонентов систем электроснабжения повышенной частоты.....	117
4.2. Методика экспериментальных исследований характеристик систем электроснабжения повышенной частоты.....	124
4.3. Электрические характеристики установившихся режимов работы различных схемных решений устройств электроснабжения повышенной частоты.....	128
4.4. Исследование установившихся режимов работы при электроснабжении потребителей с реактивной нагрузкой.....	137
4.5. Оценка параметров и характеристик магистральной системы электроснабжения промышленного назначения.....	148
4.6. Выводы по главе 4.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	187

Введение

В.1 Актуальность темы. Важнейшим направлением государственной политики Российской Федерации является глубокая модернизация экономики в целях значительного повышения эффективности и конкурентоспособности промышленного производства. Основными факторами такой модернизации являются снижение удельных затрат энергии на выпуск готовой продукции, т.е. повышение энергоэффективности и энергосбережения в сфере 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 ярким примером этого является совершенствование известных и создание новых электротехнологических процессов с применением электрических токов и напряжений непромышленной частоты (современные сварочные и лазерные установки, выполненные на основе полупроводниковых преобразователей 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.). В этом случае используются переменные токи и напряжения с частотами, достигающими десятков и сотен килогерц, получение которых обеспечивается применением источников питания со встроенными преобразователями напряжения и частоты.

Применяемые в настоящее время схемотехнические решения для электропитания и электроснабжения таких устройств на промышленных предприятиях остаются неизменными длительное время. Наиболее распространённым является электропитание технологических установок в пределах цехов по кабельным линиям напряжением 0,4 кВ. При существующих подходах к организации системы электропитания 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 ЭТО 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.

В.2 Степень разработанности темы исследований. Перспективные технические решения в области систем промышленного 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 2500 А, рабочее напряжение до 6000 В), уменьшению потерь электроэнергии в открытом состоянии, повышению скорости переключения, быстрому и значительному снижению стоимости, габаритов и веса и т.д. Возможность создания и применения мощных и эффективных преобразователей напряжения на основе IGBT транзисторов позволяет рассмотреть новые способы организации локальных систем промышленного (производственного) электропитания нового поколения для устройств, работающих на напряжении повышенной частоты с помощью централизованного источника электропитания повышенной частоты. Сочетая в себе силовой

полупроводниковый преобразователь напряжения повышенной частоты, высоковольтные кабельные электропередачи повышенной частоты, силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты и потребителей специального назначения (например, объекты ЭТО железобетонных изделий), такое устройство образует локальную систему промышленного электроснабжения или 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. Особенно актуальной является проблема разработки математической модели установившихся режимов работы и компонентов таких ЭТКПЧ, представляющих собой систему электроснабжения магистрального типа.

На основании изучения современного уровня научно-технических разработок по применению силовой электроники в системах промышленного электроснабжения сформулированы цели и задачи настоящей работы.

В.3 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.

В.4 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.

В.5 Объект и предмет исследований. Объектом исследования является локальный ЭТКПЧ, включающий в себя полупроводниковый преобразователь напряжения, высоковольтные кабельные линии повышенной 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.). Предметом исследования являются методики расчета, анализа установившихся режимов работы и компонентов ЭТКПЧ.

В.6 Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.09.03 в диссертационной работе объектом исследований является электротехнических комплекс, включающий в себя полупроводниковый преобразователь напряжения, высоковольтные кабельные линии повышенной частоты, силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты и потребителей электрической энергии.

Соответствие диссертации области исследования специальности: представленные в диссертации результаты соответствуют области исследования специальности 05.09.03, а именно:

– п. 1: «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»

– п. 2: «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем»

– п. 3: «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях»

– п. 4: «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях»

– п. 5: «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса»

В.7 Методология и методы научных исследований. Для решения задач в работе использовались методы физического и математического моделирования, методы теории электрических цепей, моделирование на ЭВМ с использованием программного комплекса MATLAB и Mathcad.

В.8 Научная новизна работы:

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.

В.9 Теоретическая значимость работы:

разработана и обоснована методика электрического расчета установившихся режимов работы электротехнических комплексов повышенной частоты (ЭТКПЧ) в виде системы промышленного электроснабжения магистрального типа, разработана методика расчета величины погонной емкости двухпроводных кабельных линий ЭТКПЧ с «полувоздушной» изоляцией, знание которой необходимо для достоверного расчета характеристик ЭТКПЧ. Кроме этого, успешно решена задача по усовершенствованию самой процедуры расчета характеристик установившихся режимов работы таких устройств, основанной на принципах частотного анализа, в целях существенного повышения производительности вычислений. Тем самым был сделан значительный вклад, не имеющий аналогов, в развитие и совершенствование общей математической модели ЭТКПЧ.

В.10 Практическая значимость результатов работы:

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, установки индукционного нагрева.

3. Установлено, что системы электроснабжения магистрального типа по своим показателям и характеристикам не уступают системам электроснабжения радиального типа при меньших стоимости и более высокой компактности. Оценка основных показателей и характеристик ЭТКПЧ в виде систем электроснабжения магистрального типа

производственного назначения свидетельствуют 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 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.

В.11 Достоверность и обоснованность результатов

– 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.

В.12 Основные научные 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.

В.13 Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке: нет.

В.14 Внедрение результатов исследований.

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.

В.15 Личный вклад автора заключается

в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке методик расчета на основе частотного анализа и моделировании 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 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.

В.16 Апробация результатов исследований. 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 Международных научно-технических конференциях «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.

В.17 Публикации.

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражено в 22 публикациях автора объемом 5,9 п.л., авторский вклад – 1,41 п.л., из них 7 работ, опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях по списку ВАК. в том числе 3 работы – в журналах, индексируемых в международной базе Scopus, а также получены 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

В.18 Структура и объём диссертации. Работа, кроме введения, включает 4 главы, заключение, библиографический список и приложение. Библиографический список содержит 128 источников. Общий объём диссертации составляет 191 страница, из них основной текст – 156 страниц, список литературы – 18 страниц, приложения – 5 страниц

Глава 1. Современный уровень научно-технических разработок по применению силовой электроники в системах промышленного электроснабжения

Под системой электроснабжения принято подразумевать совокупность устройств для производства, передачи и распределения электрической энергии [1÷5].

Системы электроснабжения на промышленных предприятиях создаются для обеспечения питания электроэнергией промышленных приемников электрической энергии, к которым относятся электродвигатели, электрические печи, электролизные установки, электротехнологические установки, аппараты и машины для электрической сварки, осветительные установки и другие промышленные приемники электроэнергии [1÷4]. Одним из новых видов нагрузки промышленных предприятий является установки для осуществления электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты [6÷10]. Нельзя не отметить, что необходимость в электроснабжении и возникла одновременно с широким развитием промышленного производства и внедрением систем автоматизации промышленных процессов [1÷4].

1.1. Существующие технические решения в сфере систем промышленного электроснабжения

Потребителей электроэнергии в системе электроснабжения принято разделять по номинальному напряжению (до или свыше 1 кВ) и по виду используемого напряжения (постоянное или переменное). Нормативные документы устанавливают следующие соответствующие классы напряжения с учетом типа используемого напряжения [2,3]:

- 1) Приемники энергии напряжением до 1 кВ: 220, 380 и 660 В;
- 2) Приемники энергии напряжением выше 1 кВ: 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ;
- 3) Приемники энергии постоянного тока: 110, 220 и 440 В.

Выбор величины напряжения потребителей (приемников) электрической энергии для построения сети промышленного предприятия определяют дальнейшую конфигурацию всей сети внутреннего электроснабжения и внешнего электроснабжения.

Можно отметить факт, что для внутрицеховых электрических сетей наибольшее распространение получило напряжение 380/220 В. Его важнейшим преимуществом является возможность одновременного питания силовых и осветительных электроприемников при ограниченной мощности приемника. Класс напряжения с величиной 220/127 В применяется крайне редко (системы оперативного тока с преобразованием напряжения), а для целей питания силовых потребителей не применяется ввиду неэффективности. Класс напряжения 660/380 В обеспечивает более высокую пропускную способность при малых сечениях проводов, однако требуется его преобразование (понижение с помощью силовых трансформаторов) для использования, к примеру, в целях освещения. Применение подобного класса напряжения целесообразно при высоких протяженностях линий и значительной удаленности приемников электрической энергии.

С целью снижения потери напряжения у потребителя целесообразно увеличивать класс напряжения электрооборудования и систем электроснабжения при одинаковой номинальной мощности оборудования $S_{НОМ}$ согласно формуле [1,2]:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot r_{np} = \sqrt{3} \cdot \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} \cdot r_{np} \quad (1.1)$$

где $U_{НОМ}$ - номинальная напряжение электрооборудования; r_{np} - активное сопротивление проводников.

В настоящее время все промышленные предприятия дополнительно можно разделить по способу энергоснабжения на две большие группы: имеющие собственную ТЭЦ для производства тепловой/электрической энергии и те предприятия, в составе которых нет собственной генерации и потребляющие тепловую и электрическую энергию.

Условная схема выработки и распределения электроэнергии на территории промышленного предприятия, имеющего, например, собственную ТЭЦ представлена на рис. 1.1 [1]:

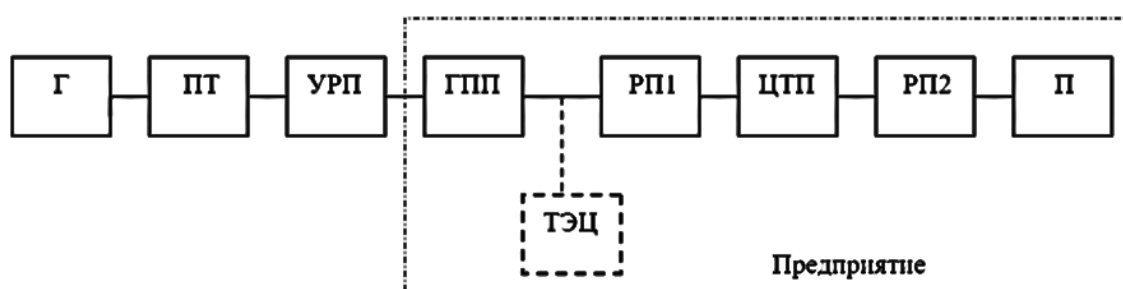


Рис. 1.1. Структурная схема выработки, передачи и распределения электрической энергии на предприятии. Г – генератор, П – потребители, ПТ – понижающие или повышающие трансформаторы, УРП – узловые распределительные подстанции, ГПП – главные понизительные подстанции, ЦТП – цеховые трансформаторные подстанции, РП – распределительные пункты

В ряде случаев для крупных предприятий становится необходимым комбинированное питание от единой электрической системы и собственной ТЭЦ. Предпосылками для сооружения собственной ТЭЦ на территории промышленного предприятия являются:

1. Резервирование питания для ответственных потребителей (1 категории);
2. Необходимость использования тепловой энергии (отопление, технологический процесс);
3. Удаленность предприятия от единой ЭЭС.

В случае отсутствия ТЭЦ или ТЭС непосредственно на территории промышленного предприятия структурная схема распределения электрической энергии может быть представлена в виде на рис. 1.2 [1].

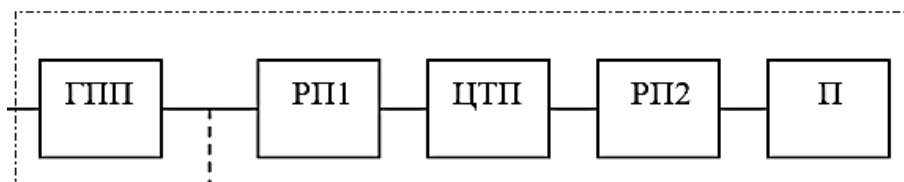


Рис. 1.2. Структурная схема выработки, передачи и распределения электрической энергии на предприятии при отсутствии собственной генерации. Г – генератор, П – потребители, ГПП – главные понизительные подстанции, ЦТП – цеховые трансформаторные подстанции, РП – распределительные пункты

Современные турбогенераторы на электрических станциях вырабатывают электрическую энергию на генераторном напряжении 6÷24 кВ. Распределение электрической энергии при удалении потребителя на большие расстояния с применением таких классов напряжения не используется на практике, применяются ВЛЭП на существенно более высокие классы напряжения (до 1150 кВ).

Анализируя рис.1.1. и рис. 1.2. можно сделать вывод о том, что электрическая энергия на территории промышленного предприятия распределяется по сложной разветвленной схеме с применением напряжений до 6÷10 кВ. При этом можно отметить следующие характерные особенности:

1. Использование большого числа кабельных линий
2. Преобладающее использование на ГПП напряжение 6÷10 кВ.
3. Использование основного напряжения в 380/220 В для подключения большинства потребителей.
4. Потери мощности при распределении и передачи электроэнергии в рамках промышленного предприятия.

Для оценки потерь мощности в сетях можно воспользоваться следующим соотношением [1,2]:

$$\Delta P = I^2 \cdot r_{np} = \sqrt{3} \cdot \frac{S_{НОМ}^2}{3 \cdot U_{НОМ}^2} \cdot r_{np} \quad (1.2)$$

Как в случае и со снижением напряжения для уменьшения потерь активной мощности необходимо увеличивать величину рабочего

напряжения, что говорит о том, что существующий класс напряжения 220/380 В приводит к наличию больших потерь в сетях низкого напряжения.

Согласно [1,2,4] различают несколько принципиальных схем организации электропитания на промышленном предприятии: радиальная, магистральная и смешанные (комбинации указанных выше схем). В любом случае, схемы электрических сетей конструируются так, чтобы обеспечивать надежное питание потребителей, обладать высокими технико-экономическими показателями. При этом расходы на сооружение сети, потребление проводникового материала и потери электроэнергии должны быть минимальными.

Пример организации радиальной сети представлен на рис. 1.3.

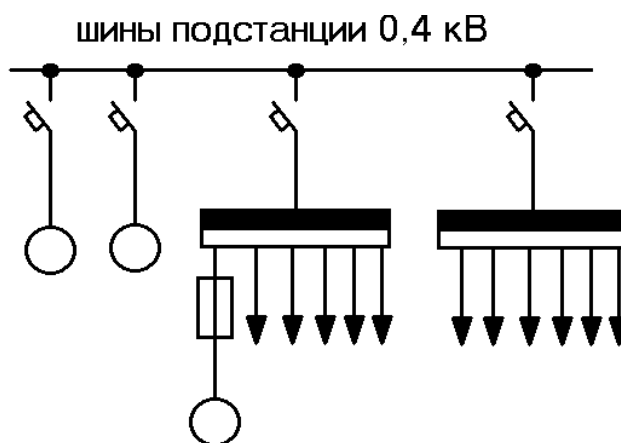


Рис. 1.3. Радиальная схема электрической сети

При выполнении радиальной схемы (рис. 1.3) питание каждого потребителя осуществляется по отдельной линии. Для подключения потребителей с большой мощностью (100 кВт и выше) используется подключение от подстанции, а остальные потребители от распределительных пунктов, каждый из которых подключен к подстанции отдельной кабельной линией.

К преимуществам радиальной схемы относят высокая надежность, т.к. повреждение на одной из кабельных линий не влияет на работу других потребителей.

Основными недостатками радиальных схем: большой расход проводникового материала; большое количество распределительных пунктов и защитных аппаратов [4].

Пример организации магистральной сети представлен на рис. 1.4.

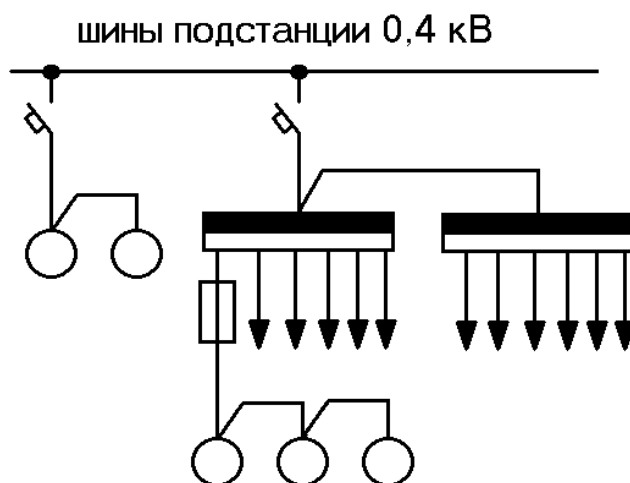


Рис. 1.4. Магистральная схема электрической сети

При реализации магистральной схемы (рис. 1.4) к каждой линии, отходящей от подстанции, подключается несколько распределительных пунктов и/или электропотребителей большой мощности.

На каждую линию, отходящую от распределительного пункта, подключается, как правило, не более трех потребителей электроэнергии (возможны исключения).

Достоинства магистральных схем: требуют малое количество электрооборудования; высокая гибкость, т.е. возможность перестановки оборудования без переделки сети.

Недостаток: малая надежность, т.к. авария на одной линии может вызвать отключение нескольких потребителей, поэтому магистральные схемы в чистом виде можно использовать только для потребителей III категории электроснабжения (допускающие перерыв в электропитании)[1,2,4].

Сравнительные достоинства и недостатки обеих вариантов схем приведены в таблице 1

Сравнение двух типов схем организации электропитания

Таблица 1

	Радиальная	Магистральная
+	1. Надежность	1. Гибкость схемы 2. Малое количество оборудования 3. Расширение сети без переделки
-	1. Расход провода 2. Большое количество защитных аппаратов 3. Наличие большого числа распределительных пунктов	1. Низкая надежность (авария на одной линии вызывает отключение других потребителей)

Таким образом, оптимальным решением является сочетание элементов радиальных и магистральных схем при проектировании системы электропитания промышленного предприятия. Однако для целей технологического процесса согласно ПУЭ [5] допускается введение как дополнительных или специальных величин рабочего напряжения, частоты и т.п. с классификацией соответствующих сетей как сети специального назначения.

1.2. Перспективные направления научно-технического прогресса в области систем электроснабжения промышленных предприятий

Перспективным направлением научно-технического прогресса в области применения токов и напряжений с особой формой кривой изменения во времени и частотой в электротехнике является применение метода электротепловой (электротермической) обработки бетона (ЭТО) токами повышенной частоты [6÷10] электродным методом.

Как показано в [6÷10], выполнена значительная работа в области применения электротепловой обработки бетона, технико-экономического сравнения с существующей тепловлажностной обработкой (ТВО). Для осуществления ЭТО требуется полупроводниковый силовой источник питания, выполненный на основе преобразователя напряжения с

использованием силовых транзисторов, кабельные линии электропередачи и силовые трансформаторы. Источник использует выпрямитель сетевого напряжения 220/380 В и преобразователь частоты, формируя 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. 1.5)

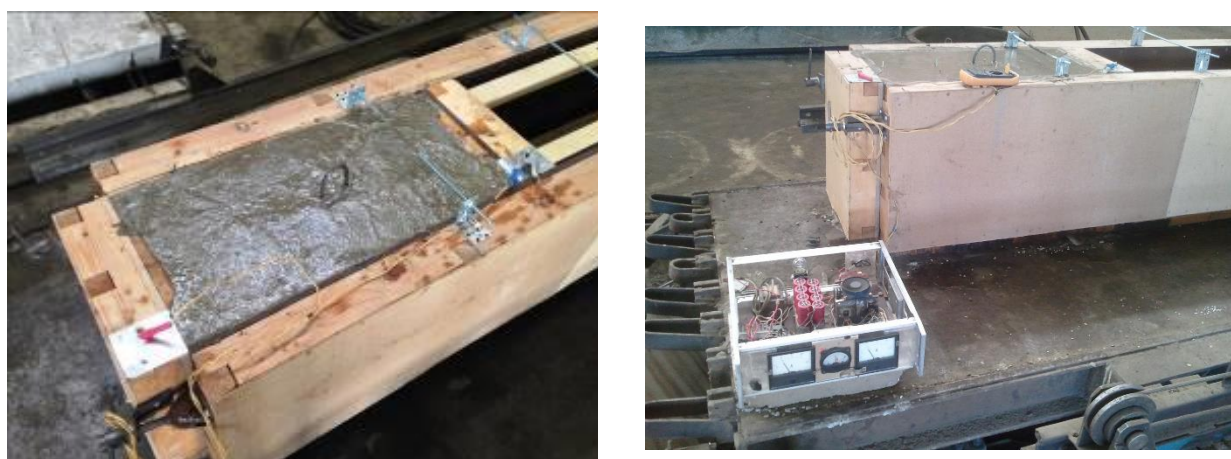


Рис. 1.5. Подготовительная стадия и осуществление ЭТО токами повышенной частоты

Применение электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты позволяет существенно повысить технико-экономические параметры производства, увеличить КПД обработки, снизить потери энергии, уменьшить сроки получения готовых изделий, снизить себестоимость производства и т.п. [6÷13]. Также разрабатываются технологии предварительного разогрева бетона с помощью применения электротехнической установки высокого напряжения [7,13,14].

Для обеспечения ЭТО на объект подается напряжение с рабочей частотой (5–20 кГц). Выбор конкретной величины частоты питающего напряжения определяется технологическим процессом, условиями электробезопасности эксплуатирующего персонала. Нетрудно сделать вывод, что возникает важная задача – организация рационального 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.

С учетом вариантов компоновки сети (разд. 1.1) и требований ПУЭ [5] были проанализированы два варианта организации сети электропитания для осуществления ЭТО на промышленном предприятии [15÷17]:

- низковольтная сеть промышленной частоты;
- сеть специального назначения повышенной частоты с номинальным напряжением выше 1000 В;

Наиболее распространенный вариант подключения объекта(-ов) электротепловой обработки к радиальной сети 0,4 кВ промышленного предприятия при его реализации на напряжении промышленной частоты 50 Гц представлен на рис. 1.6.

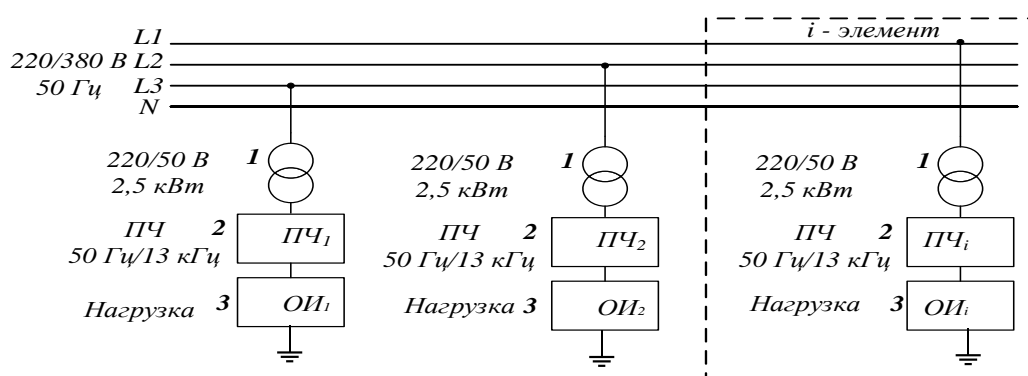


Рис. 1.6. Схема подключения объектов ЭТО к сетям 0,4 кВ промышленной частоты действующего предприятия сборного железобетона. 1 – понижающий трансформатор, 2 – преобразователь частоты, 3 – нагрузка (обрабатываемое изделие – например, фундаментный блок)

Для преобразования напряжения промышленной частоты в напряжение повышенной частоты применяется полупроводниковый низковольтный преобразователь частоты 2 (рис. 1.6) ($ПЧ_i$). Для обеспечения электробезопасности персонала, согласно требованиям ПУЭ [5] и технологического процесса ЭТО применяется понижающий трансформатор 1 (рис. 1.6) промышленной частоты, например, мощностью 2,5 кВА. Такой

трансформатор может быть подобран из каталогов-производителей или изготовлен на заказ. Нагрузка 3 – электроды с опалубкой для электротепловой обработки и бетонная смесь. Необходимая мощность для прогрева блока при выполнении ЭТО равна 2,5 кВт (мощность ЭТО зависит от объекта обработки и в указанном случае соответствует фундаментному блоку 1100x580x400мм). Количество объектов ЭТО на крупном строительном предприятии может достигать десятков и сотен единиц [7,9,13].

При использовании радиальной схемы электропитания установок ЭТО, изображенной на рис. 1.6, выполненной с использованием сети напряжения промышленной частоты, возникает ряд технико-экономических и конструктивных проблем:

- 1) трудности распределения потребителей по фазам, наличие тока в нулевом проводе и вызванные им проблемы [15,18];
- 2) необходимость применения большого числа понижающих трансформаторов промышленной частоты;
- 3) большое количество преобразователей частоты;
- 4) сложная электромагнитная обстановка (ЭМО) на предприятии из-за больших преобразователей частоты;
- 5) сложность автоматизации и гибкого управления технологическим процессом;
- 6) низкая надежность системы;
- 7) напряжение 0,4 кВ и связанные с этим потери электроэнергии при передаче больших мощностей [1,2,4,15];
- 8) затрудненная реализация такой схемы электропитания (согласно требованиям ПУЭ [5], раздел электротермические установки (ЭТУ), установки индукционного и диэлектрического нагрева);

- 9) затрудненность реализации в условиях действующего промышленного производства.

Кроме того, применение системы, показанной на рис. 1.6, вызывает противоречие требованиям ПУЭ [5] в области организации электропитания установок диэлектрического и индукционного нагрева (п. 7 [5]), в которых преобразователь частоты, при наличии технической возможности, должен быть установлен в изолированной части (отдельном помещении) на производстве.

С учетом недостатков, присущих системе электропитания на рис. 1.6, возникает необходимость в разработке систем электропитания нового поколения. Такая система представляет собой локальный электротехнический комплекс повышенной частоты (ЭТКПЧ) 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 [16÷17].

Одной из ключевых особенностей системы является централизованный источник питания повышенной частоты – полупроводниковый преобразователь напряжения, выполненный на основе компонентов силовой электроники (IGBT – транзисторы), высоковольтные кабельные линии (распределительная сеть) и трансформаторы повышенной частоты, образующих совместно с потребителями (объектами ЭТО) единый локальный электротехнический комплекс повышенной частоты.

Согласно [1,2,4,5] напряжение питания потребителей специального назначения и питающих линий к этим потребителям, может выбираться отличным от стандартного ряда напряжений [19], и определяется технико-экономическими параметрами производства. Согласно ПУЭ [5] 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) [16,20,21,22].

На рис. 1.7 в качестве примера показана упрощенная схема такого ЭТКПЧ.

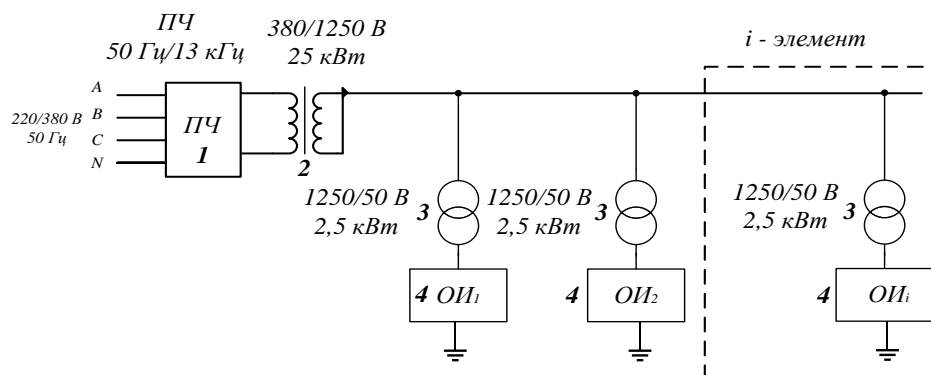


Рис. 1.7. Схема подключения объектов ЭТО к локальному ЭТКПЧ сети повышенной частоты действующего предприятия сборного железобетона. 1 – преобразователь частоты, 2 – силовой повышающий трансформатор повышенной частоты, 3 – понижающий трансформатор повышенной частоты, 4 – нагрузка (обрабатываемое изделие, например, фундаментный блок); мощность системы рассчитана на одновременную ЭТО i изделий

Схему электропитания, указанную на рис. 1.7, следует характеризовать 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).

Сравнение схемы электропитания на рис. 1.6 и рис. 1.7 позволяет выделить следующие отличительные преимущества последней схемы (рис.1.7)

- 1) Появление одного мощного преобразователя частоты, локализованного на территории предприятия, вместо множества маломощных преобразователей, что снижает стоимость оборудования, упрощает эксплуатацию;

- 2) Существует возможность автоматизации и гибкого управления технологического процесса в ЭТО;
- 3) Используется двухпроводный кабель вместо четырехпроводной системы;
- 4) Равномерная нагрузка по фазам питающей сети за счет применения преобразователя напряжения с трехфазным подключением.

Применение преобразователя частоты с современными транзисторами (IGBT) с малым временем переключения (микросекундный диапазон) создает импульсные помехи в питающую сеть (кондукторного и индуктивного типа), поэтому необходима разработка мер для обеспечения требований электромагнитной совместимости на предприятиях [16].

1.3. Математическое и физическое моделирование устройств промышленного электроснабжения на основе полупроводниковой преобразовательной техники

Одним из современных способов проведения исследований в области науки и техники является применение математического моделирования [16]. Можно классифицировать математические модели по принципу построения – аналитические и имитационные. Аналитическое моделирование основано на описании объекта с помощью набора начальных и граничных условий, математических формул и уравнений, а также логических условий, в совокупности составляющих некий программный код [16]. Данный код описывает алгоритм вычисления и, по сути, отражает внутреннюю структуру объекта моделирования. Имитационное моделирование предполагает описание каждого элемента объекта и выполнение связи между ними с помощью набора стандартных блоков среды моделирования. Сохраняется

внутренняя структура объекта и описывается взаимодействием объекта с другими объектами [16].

В настоящее время для моделирования ЭТКПЧ могут быть применены следующие программные комплексы для математического моделирования: MATLAB с пакетом Simulink, ATP, EMTP, RSCAD и др. [23,24].

Исследования ЭТКПЧ с применением математического моделирования (аналитическая модель) могут быть выполнены в MATLAB. Для этого по принципиальной схеме ЭТКПЧ радиального типа, представленной на рис. 1.8, составляется схема замещения, с учетом методов замещения реальных процессов теорией цепей [25,26,27].

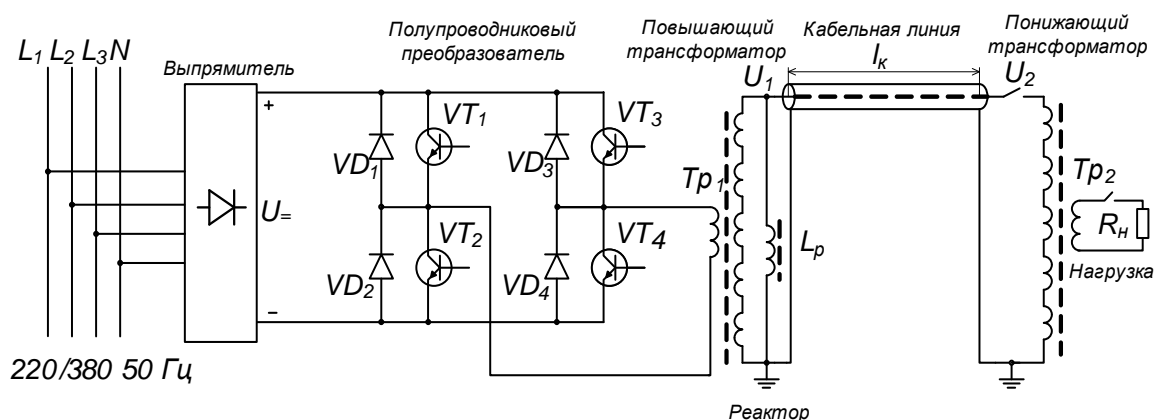


Рис. 1.8. Электрическая схема ЭТКПЧ радиального типа, где VT_1 - VT_4 , VD_1 - VD_4 – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя соответственно, Tp_1 , Tp_2 – повышающий и понижающий силовые трансформаторы, l_k – длина кабельной линии электропередачи, L_p – реактор

На рис. 1.9 показаны два варианта схемы замещения ЭТКПЧ – с представлением высоковольтной кабельной линии с помощью элемента с сосредоточенными параметрами (рис. 1.9,а), либо как элемент с распределёнными параметрами (рис. 1.9,б).

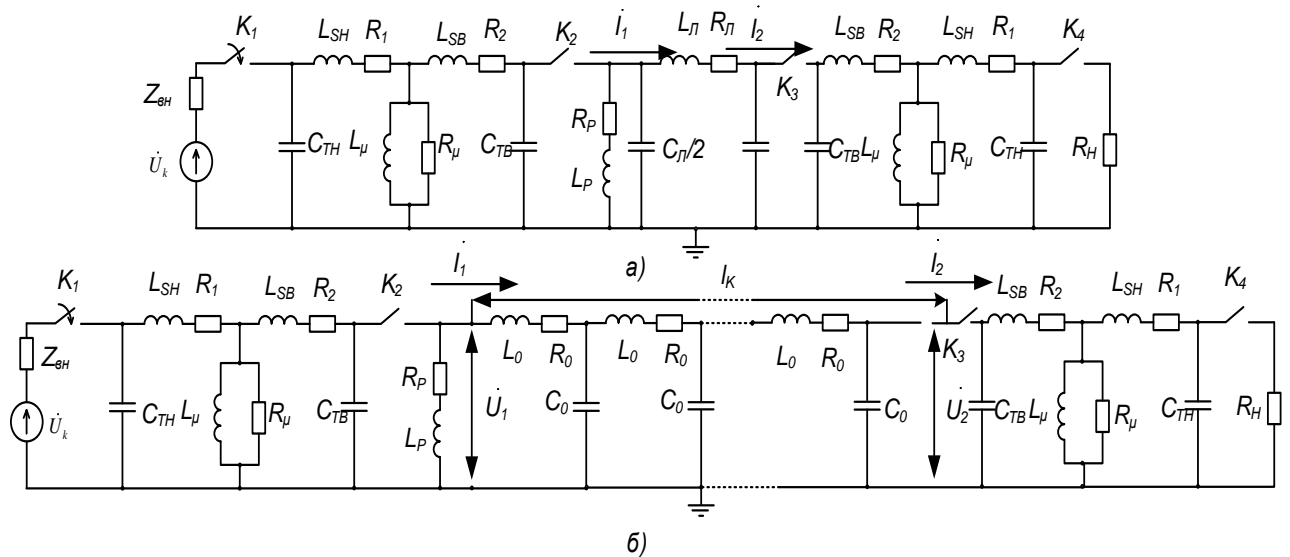


Рис. 1.9. Схема замещения ЭТКПЧ с высоковольтной кабельной электропередачей повышенной частоты (рис. 2.1), где \dot{U}_k – источник напряжения k -й гармоники, Z_{gh} – внутренне сопротивление источника напряжения, $C_{тн}$ и $C_{тв}$ – емкость обмоток низкого и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно, L_{sh} и L_{sv} – индуктивности рассеивания обмоток низшего и высокого напряжения силовых трансформаторов соответственно, R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток низкого и высокого напряжения силовых трансформаторов, соответственно, R_μ и L_μ – активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания трансформатора, R_p – активное сопротивление реактора, L_p – индуктивность реактора, C_l , L_l , R_l – емкость, индуктивность, активное сопротивление кабельной линии электропередачи, R_n – 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)

Для электрического расчета ЭТКПЧ с использованием этих схем замещения удобно использовать метод эквивалентных преобразований теории цепей, а также метод частотного анализа [25 ÷ 32]. При этом реальная кривая изменения ЭДС источника во времени, характерная осциллограмма которой представлена на рис. 1.10, представляется как сумма нечетных гармоник кратных основной частоты посредством разложения в ряд Фурье. Далее выполняется электрический расчет по схеме замещения отдельно для каждой гармоники [16,27,32,33]. Результирующие значения токов, напряжений и мощности в различных точках схемы замещения определяются посредством суммирования гармоник, полученных для этих точек по результатам расчета.

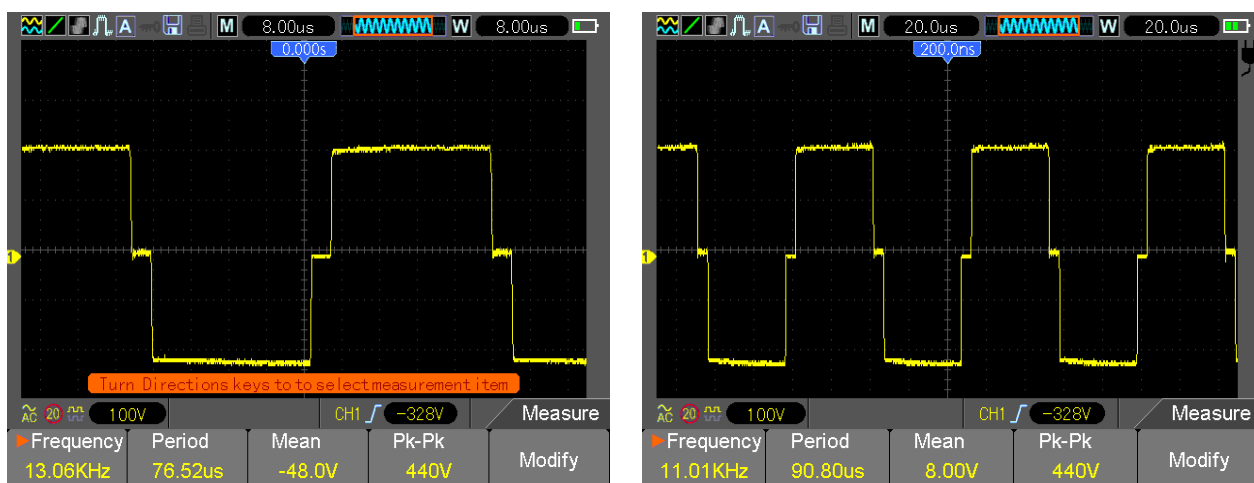


Рис. 1.10. Характерные экспериментальные осциллограммы ЭДС транзисторного преобразователя напряжения при различной скорости развертки [16]

При выполнении расчетов для схемы замещения (рис. 1.9,б) используются уравнения длинной линии, которые устанавливают связь между значениями напряжения и тока в начале и в конце линии [27,30,31]:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l_K + \dot{I}_2 z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_K; \quad (1.3)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l_K + \frac{\dot{U}_2}{z} \operatorname{sh} \gamma l_K$$

или

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma l_K - \dot{I}_1 z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_K; \quad (1.4)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma l_K - \frac{\dot{U}_1}{z} \operatorname{sh} \gamma l_K,$$

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,

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (1.5)$$

– волновое сопротивление линии,

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (1.6)$$

$$\alpha = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0} \right)^2} - 1 \right]}, \quad (1.7)$$

$$\beta = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0} \right)^2} + 1 \right]} \quad (1.8)$$

Математическая модель [16,25,27], выполненная с учетом описания ЭТКПЧ согласно рис. 1.9 позволяет выполнять расчет и исследовать режимы работы комплекса в относительно простых случаях – радиальных схем электроснабжения (со схемой, указанной на рис. 1.3). Математические модели, пригодные для расчета магистральных линий в настоящее время отсутствуют.

Кроме этого, предложенная расчетная методика и программа на ее основе [16,27] не вполне пригодна для моделирования разветвленных ЭТКПЧ, которые являются актуальными для локальных систем электроснабжения, использующих одновременно несколько промышленных установок или потребителей.

Можно отметить основные недостатки, выявленные при использовании аналитической математической модели [16,27]:

- 1) Рост числа потребителей (нагрузки) сопровождается значительной переработкой программного кода MATLAB;
- 2) Значительные затраты времени на выполнение электрического расчета из-за многократного выполнения численного интегрирования при

разложении кривой ЭДС в ряд Фурье, продолжительность вычислений может составлять несколько часов.

- 3) Дополнительная переработка программы (задание новых переменных и начальных условий) при изменении конфигурации системы электроснабжения;
- 4) Увеличение числа доработок и времени на совершенствование программы применительно к конкретным условиям.

Указанную проблему можно решить путем имитационного блочного моделирования в системе Simulink, являющейся приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием S-модели реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом S-модель позволяет создавать собственные блоки (подсистемы) и включить в модель собственные справочные средства [23,24].

Процесс построения S-модели включает в себя компоновку модели и задание необходимых параметров. Компоновка заключается в выборе из библиотек необходимых блоков, их размещение в открывшемся окне и соединение между собой (рис. 1.11). Далее для каждого блока устанавливаются соответствующие параметры, отвечающие требованиям моделируемой системы.

В качестве источника питания может быть использован созданный блок Power Supply Trap Pause sin, моделирующий выходное напряжение повышенной частоты формой «трапеция с паузой» с амплитудой 250 В и частотой 13000-14000 Гц, при этом время нарастания/спада кривой составляет 0,7 мкс, а длительность паузы составляет 1,6 мкс.

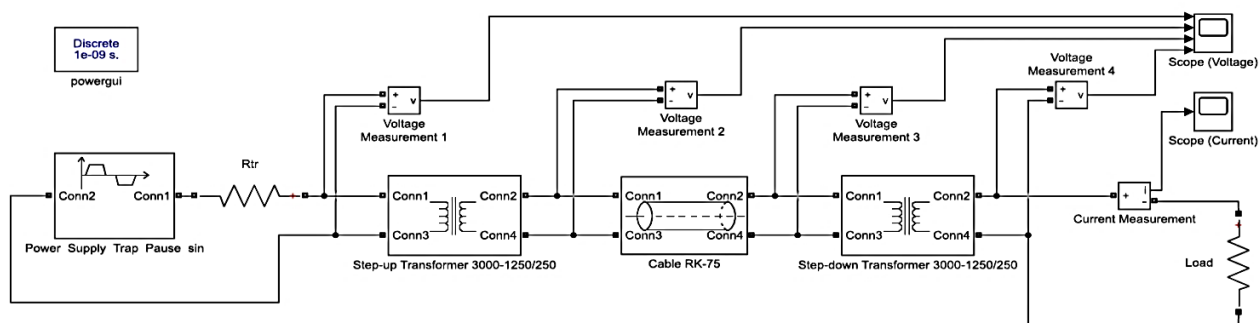


Рис. 1.11. S-модель ЭТКПЧ, скриншот из программы Simulink

Модель (рис. 1.11) содержит блок последовательной RLC-цепи, моделирующий внутреннее сопротивление транзисторов реального преобразователя напряжения, с величиной активного сопротивления 0,04 Ом согласно п. 1.4.

Затем из созданной библиотеки в цепь включен повышающий трансформатор Step-up Transformer 3000-1250/250.

В качестве линии электропередачи установлена разработанная S-модель коаксиального кабеля Cable RK-75, также работающей на частоте 13000-14000 Гц.

Также из библиотеки включен понижающий трансформатор Step-down Transformer 3000-1250/250.

В качестве нагрузки используется блок последовательной RLC-нагрузки Load (описание стандартного блока приводится в приложении А). Номинальное напряжение и частота нагрузки равна соответственно 250 В и 13000-14000 Гц. Предполагается, что нагрузка потребляет исключительно активную нагрузку, поэтому параметры Inductive reactive power, Capacitive reactive power приравниваются к нулю.

Для снятия осциллограмм токов и напряжений добавлены блоки измерителя напряжения Voltage Measurement 1 – Voltage Measurement 4, измерителя тока Current Measurement и осциллографа Scope (Voltage), Scope (Current). Однако для уверенного применения имитационного моделирования ЭТКПЧ в дальнейшем требуется проведение дополнительных

и достаточно объемных исследований, подтверждающих достоверность такого способа исследования режимов работы ЭТКПЧ [23,24].

Сравнение возможностей и затрат ресурсов имитационного и аналитического математического моделирования склоняет к выводу о целесообразности предпочтительного применения на практике последнего с учетом необходимости дальнейшего развития и совершенствования методов математического моделирования [16,23,24,27].

Вполне очевидно, что при выполнении электрического расчета ЭТКПЧ посредством математического моделирования универсальным является вариант схемы замещения с представлением линии, входящей в состав этого устройства, как элемента с распределенными параметрами (рис. 1.9,б), однако применение схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 1.9,а) в некоторых случаях может заметно упростить выполнение расчетов [34]. В настоящее время практически отсутствуют точные рекомендации по выбору варианта схемы замещения для получения достоверных результатов электрического расчета ЭТКПЧ.

Существует большое разнообразие схемотехнических решений для полупроводниковых преобразователей напряжения. Однако для установок большой мощности, например, в электроэнергетике, основное применение получили преобразователи, выполненные с использованием силовых высоковольтных IGBT транзисторов и собранные по мостовой или полумостовой схеме (рис. 1.12) [35÷40].

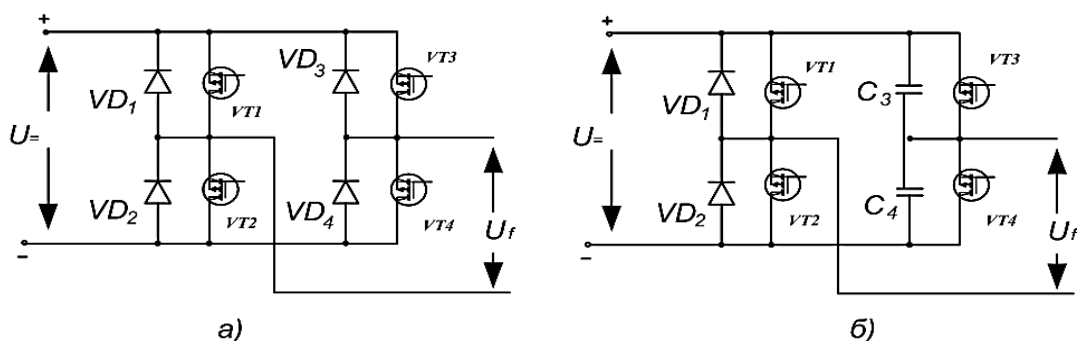


Рис. 1.12. Схемы преобразователя: а) – мостовая, б) – полумостовая; VT_1 – VT_4 , VD_1 – VD_4 – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя соответственно, C_3 – C_4 – емкости, $U_$ – постоянное напряжение на входе, U_f – переменного напряжения с частотой f

Для повышения технико-экономических параметров транзисторных преобразователей проводится большое количество разносторонних исследований в этой области, появляются новые серийные промышленные образцы высоковольтной силовой электроники. Например, разработаны универсальные модульно-интегрированные преобразователи напряжения с интегрированным преобразователем частоты, т.н. «умножителем частоты», построенных с применением многофункциональных модулей трансформаторного типа [41÷43]. Исследования посвящены вопросам управления и коммутации полупроводниковых приборов в системах электропитания электрофизических и других установок большой мощности, создания классической схемы параллельного инвертора тока, используемого для индукционного нагрева и оценки потерь от работы системы управления транзисторов таких устройств, оптимизации их технико-экономических параметров [43÷45]. Производители полупроводниковой техники [45,46 и др.] предлагают наиболее современные технические решения в этой области. Прогресс в области создания и применения новых конструкций полупроводниковых преобразователей достигнутый в последние годы позволяет создавать трехфазные инверторы, с фазными интегрированными блоками на единичные фазные мощности до 30 кВт и более (например, компания Conergy) и позволяющие распределять нагрузку равномерно по всем трем фазам электросети, исключая несимметрию в ней. Такие системы обладают простотой монтажа (совместно фазы собираются в трехфазные системы), а автоматизированные системы контроля отслеживают вольтамперные характеристики в режиме реального времени [45÷47]. Похожие решения, а также широчайшая номенклатура полупроводниковой техники представлена компанией SEMIKRON [46], производящей как готовые преобразовательные модули, так и предоставляющие широкие возможности проектирования и исполнения модулей по индивидуальному техническому заданию заказчика. Разнообразие полупроводниковых устройств и их широкая номенклатура создает необходимость в классификации и упорядочивании информации [47,48]. Исследователями

предложены новые оригинальные конструкции преобразователей частоты, токов, способов моделирования преобразователей [49,50], среди которых особо выделяются матричные каскадные преобразователи частоты (МПЧ) на IGBT. Такой способ отражает возможность создания преобразователя частоты с улучшенными массогабаритными показателями и показателями качества электроэнергии на входе и выходе. Каждый каскад (матрица) преобразователя построены на полностью управляемых ключах IGBT модулей с двухсторонней проводимостью по мостовой схеме с высокочастотной синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [50÷53]. 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. При этом они не содержат звена постоянного тока (ЗПТ), т.е. лишней стадии преобразования электрической энергии и являются непосредственными преобразователями частоты (НПЧ). Их недостатком является значительное усложнение алгоритма и системы управления силовыми электронными ключами. МПЧ в настоящее время является наиболее перспективным решением в сфере энергосбережения и энергоэффективности. 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 нужд. Частота и напряжение переменного тока на выходе привода постоянно регулируется обратной связью системы управления, позволяя формировать необходимые энергетические характеристики для устройства [50÷53].

В настоящее время МПЧ разрабатываются для их использования в составе управляемых рекуперативных электроприводов переменного тока, в отраслях металлургии, металлообработки, машиностроения, добычи и переработки полезных ископаемых. Однако, вместе с тем, они с успехом могут быть использованы в электроэнергетических системах нового поколения [20,21]. Одним из важных направлений исследований по-прежнему остается исследование процессов переключения транзисторов в преобразователях, так называемое «мягкое» (плавное) переключение силовых полупроводниковых приборов, снижение потерь с переключением на высоких частотах и ШИМ при постоянной частоте [47,52,53]. Такую задачу можно эффективно решать применением резонансных преобразователей напряжения [47,52÷54].

Анализ существующих конструкций транзисторных преобразователей напряжения и методов управления полупроводниковыми силовыми компонентами, входящими в состав преобразователей, позволяет сделать вывод, что для использования в системах электроснабжения на основе ЭТКПЧ в настоящее время вполне достаточно возможностей мостового и полумостового преобразователя (рис. 1.12) [16]. Конструкция таких устройств и систем их управления отработаны, доведены до совершенства, проверены и хорошо зарекомендовали себя на практике [16,35÷40,55÷59]. Они имеют достаточно простое конструктивное выполнение и невысокую стоимость [16] и именно такие устройства можно рекомендовать для применения в составе ЭТКПЧ в обозримом будущем. Тем не менее, не следует упускать из виду необходимость дальнейшего развития и совершенствования МПЧ и резонансных преобразователей в целях использования их в составе систем электроснабжения повышенной частоты.

Как следует из рис. 1.8, обязательным элементом ЭТКПЧ линия электропередачи, которую целесообразно на практике выполнять с помощью высоковольтного кабеля [16]. Параметры кабельной линии (волновое сопротивление, погонные индуктивность и емкость, активное сопротивление)

находят свое отражение в схеме замещения ЭТКПЧ (рис. 1.9) и в значительной мере влияют на результаты электрического расчета ЭТКПЧ [16,37]. Как отмечено в [16], благодаря простой, однофазной, конструкции линии для ее изготовления целесообразно использовать коаксиальные средне и крупногабаритные радиочастотные кабели. Отечественная и зарубежная промышленность выпускает широкий спектр таких изделий, а их параметры и характеристики можно без труда определить из литературных источников [60÷64].

Анализ характеристик и конструктивного выполнения существующего широкого спектра изделий в виде кабелей, шнуров и проводов с твердой изоляцией [61] позволяет высказать предположение, что для использования в составе ЭТКПЧ будут весьма удобны линии в виде двухпроводных шнуров, выполненных из одиночных проводов с твердой изоляцией, уложенных в заземленные металлические трубу или короб. Такая линия будет иметь минимальную и весьма низкую стоимость, легко прокладывается и монтируется в производственных условиях и обеспечивает высокую электробезопасность. Однако в настоящее время практически отсутствуют сведения о параметрах таких линий, что делает необходимым разработку расчетных методик по определению этих параметров при известном конструктивном выполнении линии.

В некоторых случаях целесообразно применять в конструкции ЭТКПЧ коаксиальные или двухпроводные кабели в экране с газовой изоляцией или обладающие эффектом сверхпроводимости [34,65÷68]. Однако возможности таких кабельных линий в составе ЭТКПЧ практически не изучены. Вполне очевидным преимуществом кабельных линий с газовой изоляцией является получение минимального значения погонной емкости, т.е. зарядной (реактивной) мощности, что весьма желательно при передаче электроэнергии на повышенной частоте рабочего напряжения.

При выборе и эксплуатации кабельных линий повышенной частоты с твердой изоляцией большое практическое значение приобретает решение

задачи квалифицированного выбора либо уровня изоляции таких кабелей при известном значении рабочего напряжения, либо предельного значения рабочего напряжения при известной конструкции кабеля и вида его изоляционного материала с учетом повышенной частоты высокого напряжения. Принципиальное решение такой задачи было достигнуто в [67,70], однако не до конца проработан учет величины повышенной температуры изоляции, возникающей при работе кабеля, на результаты выбора изоляции или величины рабочего напряжения. Кроме этого, практически отсутствует порядок определения характеристик старения изоляции в процессе эксплуатации теоретическими методами, знание которых необходимо для решения указанной выше задачи [67,71].

Еще одним важнейшим вопросом конструирования, выбора и эксплуатации высоковольтных кабелей в установках повышенной частоты является обеспечение безопасных температурных режимов работы, т.к. для всех видов твердой изоляции существуют предельные значения температуры, превышение которых грозит разрушением или существенной утратой электроизоляционных свойств. Для решения такой задачи к настоящему времени разработаны и успешно применяются различные расчетные методы исследования температурных режимов высоковольтных кабелей как при использовании их в установках с традиционными параметрами токов и напряжений, так и в ЭТКПЧ [68,72÷76].

1.4. Выводы. Цель и задачи исследования

На основании информации приведенной в настоящей главе можно сделать общий вывод, что перспективным направлением научно-технического прогресса в сфере электроэнергетики является создание промышленных систем электроснабжения повышенной частоты, выполненных с использованием мощных полупроводниковых (транзисторных)

преобразователей напряжения. Несмотря на достаточно большой объем научно-технических разработок в этой сфере, выполненных в последние годы, существует необходимость дальнейшего развития теории и практики таких систем электроснабжения, а также проработки вариантов их опытно-промышленного применения. В частности, практически отсутствуют методики электрического расчета магистральных систем электроснабжения повышенной частоты.

В результате анализа существующего состояния научно-технических разработок по созданию и применению систем электроснабжения, выполненных на основе транзисторных преобразователей напряжения большой мощности, можно сформулировать цель и задачи настоящей работы.

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.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

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, отличающаяся 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.

Глава 2. Разработка и совершенствование математических моделей систем электроснабжения повышенной частоты

Согласно сведениям, приведенным в гл. 1, был выявлен ряд проблем в использовании ранее разработанных математических моделей и расчетных методик электротехнических комплексов повышенной частоты (ЭТКПЧ).

В частности, при использовании методики электрического расчета установившихся режимов, основанной на применении принципов частотного анализа [16,25,27] результаты вычислений дают завышенные значения высокочастотных составляющих токов и напряжений, особенно в режиме ХХ. Это позволяет выдвинуть предположение, что причиной такого результата является недостаточно точное представление зависимости внутреннего сопротивления транзисторов от частоты гармоник разложения Фурье.

Серьезным недостатком упомянутой выше методики [16,25,27] являются большие затраты времени на выполнение расчетов: вычисления по одному варианту исходных данных могут занимать несколько часов. Это связано с необходимостью многократного вычисления большего числа определенных интегралов численным методом из-за использования разложения Фурье с числом составляющих, достигающих 3000 и более.

Важным пробелом в математическом моделировании ЭТКПЧ является то, что методика электрического расчета установившихся режимов [16,25,27] применима только к случаю, когда система электроснабжения выполнена с помощью ЭТКПЧ по радиальному принципу, и она непригодна для расчета магистральной линии электроснабжения.

Еще одним препятствием в моделировании ЭТКПЧ является недостаток сведений о параметрах и характеристиках некоторых перспективных конструкций высоковольтных кабельных линий повышенной частоты. Например, такие сведения практически отсутствуют для двухпроводных

кабелей в электромагнитном экране: в виде двух изолированных проводов в оплётке, трубе, металлическом коробе.

Перечисленные обстоятельства требуют дальнейшего развития и совершенствования математической модели ЭТКПЧ в целях успешного создания рациональных конструкций систем промышленного электроснабжения на основе ЭТКПЧ.

2.1. Модернизация методики электрического расчета установившихся режимов работы на основе частотного анализа

Как показано в [16,27], исходя из существующих представлений о диффузионном распространении неосновных носителей заряда от эмиттерного перехода к коллекторному при работе транзистора и явления запаздывания появления тока коллектора относительно тока эмиттера, получена формула описывающая зависимость внутреннего сопротивления транзистора от кратности гармоники [16,27]:

$$Z_{внк} = \frac{Z_{вн0}}{|\alpha(\omega)|} = Z_{вн0} \sqrt{1 + \left(\frac{kf_1}{f_a}\right)^2}, \quad (2.1)$$

где

$$Z_{вн0} = 2 \frac{\Delta U_T}{I_{к0}} \quad (2.2)$$

– внутреннее сопротивление транзисторов в открытом состоянии при постоянном напряжении, k - 1,3,5... кратность гармоники; f_1 – частота первой гармоники; f_a – граничная (предельная) частота усиления (паспортное значение). $|\alpha(\omega)|$ – модуль коэффициента передачи транзистора по току. ΔU_T – падение напряжения на открытом транзисторе при постоянном токе $I_{к0}$ (паспортные значения); множитель 2 учитывает то, что последовательно с

нагрузкой включены два транзистора (рис. 1.12,а), в случае использования схемы рис. 1.12,б этот множитель равен 1.

Формула (2.1) получена на основании широко распространённого представления коэффициента передачи транзистора по току $\alpha(\omega)$ в виде следующего соотношения [36];

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_a}} = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_a}}, \quad (2.3)$$

где $\alpha_0 \approx 1$ – коэффициент передачи по току на постоянном напряжении; f – произвольное значение частоты; $\omega = 2\pi f$; $\omega_a = 2\pi f_a$.

Согласно (2.1) с увеличением кратности гармоники внутреннее сопротивление транзистора постоянно увеличивается. Это дает основание рассматривать транзистор, как фильтр низкой частоты, который подавляет в токах и напряжениях высокочастотные составляющие. Тем не менее, существующая методика электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ [16,27], в основе которой лежит применение формулы (2.1), как показал опыт, дает завышенные значения высокочастотных составляющих токов и напряжений. Это позволяет предположить, что в действительности должна существовать более сильная зависимость $Z_{внк}$ от кратности гармоники по сравнению с тем влиянием, которое определяет соотношение (2.1).

В связи с изложенным выше, целесообразно обратить внимание на наличие мнения о более корректном отображении влияния частоты на коэффициент передачи по току [36]. Действительно, выражение (2.3) можно записать в показательной форме

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_a}\right)^2}} e^{j\beta}, \quad (2.4)$$

где
$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\omega_a} \quad (2.5)$$

– угол сдвига (отставания) по фазе тока коллектора от тока эмиттера вследствие относительно медленного процесса диффузионного распространения неосновных носителей от эмиттерного перехода к коллекторному. Как показано в [36] на основе детального анализа процесса диффузии неосновных носителей в базовой области, угол сдвига по фазе при $\omega = \omega_a$ должен составлять $\beta = 60^\circ$ ($\beta = \pi/3$), однако из выражения (2.5) в этом случае ($\omega/\omega_a=1$) этот угол имеет величину 45° ($\pi/4$), т.е. формулы (2.3) и (2.4) не совсем адекватно отражают фактическую зависимость коэффициента передачи по току от частоты.

Для того чтобы устранить это противоречие формулу (2.3) необходимо скорректировать введением безразмерного поправочного коэффициента m [77,78]:

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_a} m\right)}. \quad (2.6)$$

Тогда угол сдвига по фазе (2.5) можно определить из соотношения

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\omega_a} m. \quad (2.7)$$

Полагая в этой формуле $\beta = 60^\circ$, т.е. $\beta = \pi/3$, а также $\omega = \omega_a$, из соотношения (2.7) нетрудно определить значение этого безразмерного коэффициента:

$$m = \operatorname{tg} \frac{\pi}{3} = 1,73. \quad (2.8)$$

Можно выразить модуль коэффициента передачи по току (2.6) с учетом поправочного коэффициента:

$$|\alpha(\omega)| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_a} m\right)^2}} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{kf_1}{f_a} m\right)^2}}. \quad (2.9)$$

Используя (2.9) из (2.1) нетрудно получить формулу для определения уточненного значения внутреннего сопротивления транзистора в открытом состоянии:

$$Z_{\text{внк}} = Z_{\text{вн0}} \sqrt{1 + \left(\frac{kf_1}{f_a} m \right)^2}. \quad (2.10)$$

Сравнение соотношений (2.1) и (2.10) позволяет сделать вывод, что при одинаковой частоте напряжения и кратности гармоники скорректированное значение внутреннего сопротивления транзистора (2.10) всегда будет иметь большую величину, чем значение этого параметра, полученное по ранее предложенной формуле (2.1).

Выражению (2.10) можно также дать следующее объяснение, [77,78] если записать его в комплексной форме и умножить в обе части на величину тока коллектора $I_{\kappa 0}$

$$I_{\kappa 0} \cdot Z_{\text{внк}} = I_{\kappa 0} \cdot Z_{\text{вн0}} \left[1 + j \frac{kf_1}{f_a} + j \frac{kf_1}{f_a} (\omega - 1) \right] \quad (2.11)$$

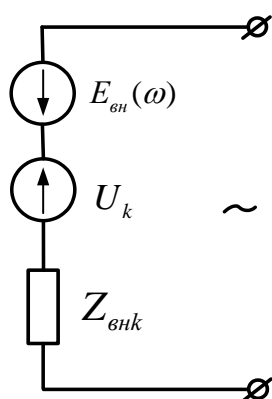
или

$$\Delta U_T(\omega) = \Delta U_T \left(1 + j \frac{kf_1}{f_a} \right) + E_{\text{вн}}(\omega), \quad (2.12)$$

где $\Delta U_T(\omega)$ – падение напряжения на открытом транзисторе при произвольных значениях частоты напряжения и кратности гармоники;

$$E_{\text{вн}}(\omega) = jI_{\kappa 0} \cdot Z_{\text{вн0}} \frac{kf_1}{f_a} = j\Delta U_T \frac{kf_1}{f_a} \quad (2.13)$$

– противо-ЭДС, отражающее скорректированное значение внутреннего сопротивления (2.10). Выражения (2.10) и (2.12) позволяют предложить новый вариант схемы замещения транзисторного преобразователя напряжения, представленный на рис. 2.1, в том случае, если для определения внутреннего сопротивления используется выражение (2.1). В случае если



$Z_{енk}$ - определяются помощью формулы (2.10), то противо-ЭДС $E_{ен}(\omega)$ необходимо удалить из схемы замещения транзисторного мостового преобразователя напряжения.

Рис.2.1. Схема замещения транзисторного преобразователя напряжения с использованием противо-ЭДС

Другой задачей совершенствования методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ является ускорение выполнения вычислений. Для ее решения следует обратить внимание на процесс вычисления параметров гармоник при разложении кривой ЭДС в ряд Фурье. Как показано в [16], наилучшим вариантом представления реальной осциллограммы ЭДС (рис.1.10) является стилизованная кривая ЭДС, показанная на рис. 2.2,а, согласно [25,27,38,78,80-82] амплитуда гармоник при разложении исходного сигнала (рис. 2.2,а) в ряд Фурье определяется посредством его интегрирования в течение одного периода колебаний: $0 \div T$, с использованием формулы следующего вида

$$U_k = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T U(t) \cdot \sin(k\omega t) dt = 2U_m \cdot f_1 \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 + I_9), \quad (2.14)$$

где $U(t)$ – аналитическое описание исходного сигнала.

При выполнении интегрирования (2.14) кривую ЭДС можно рассматривать как функцию, имеющую точки разрыва [83]. В этом случае интеграл от такой функции определяется, как сумма интегралов, в пределах тех участков, где она остается непрерывной и может быть описана аналитически [83]. Как показано на рис. 2.2,б, в рассматриваемом случае можно выделить 9 таких участков. Таким образом, интеграл за один период изменения ЭДС во времени необходимо представить, как сумму 9 слагаемых (2.14): $I_1 \div I_9$, каждое из которых соответствует одному из этих участков,

отмеченных на рис. 2.2,б, полагая, что в течение паузы (участки 1,5,9) значение ЭДС $U(t) = 0$, на участках 3 и 7 соответственно $U(t) = U_m$ и $U(t) = -U_m$, а на участках 2,4,6,8, имеет место изменение напряжения по линейному закону.

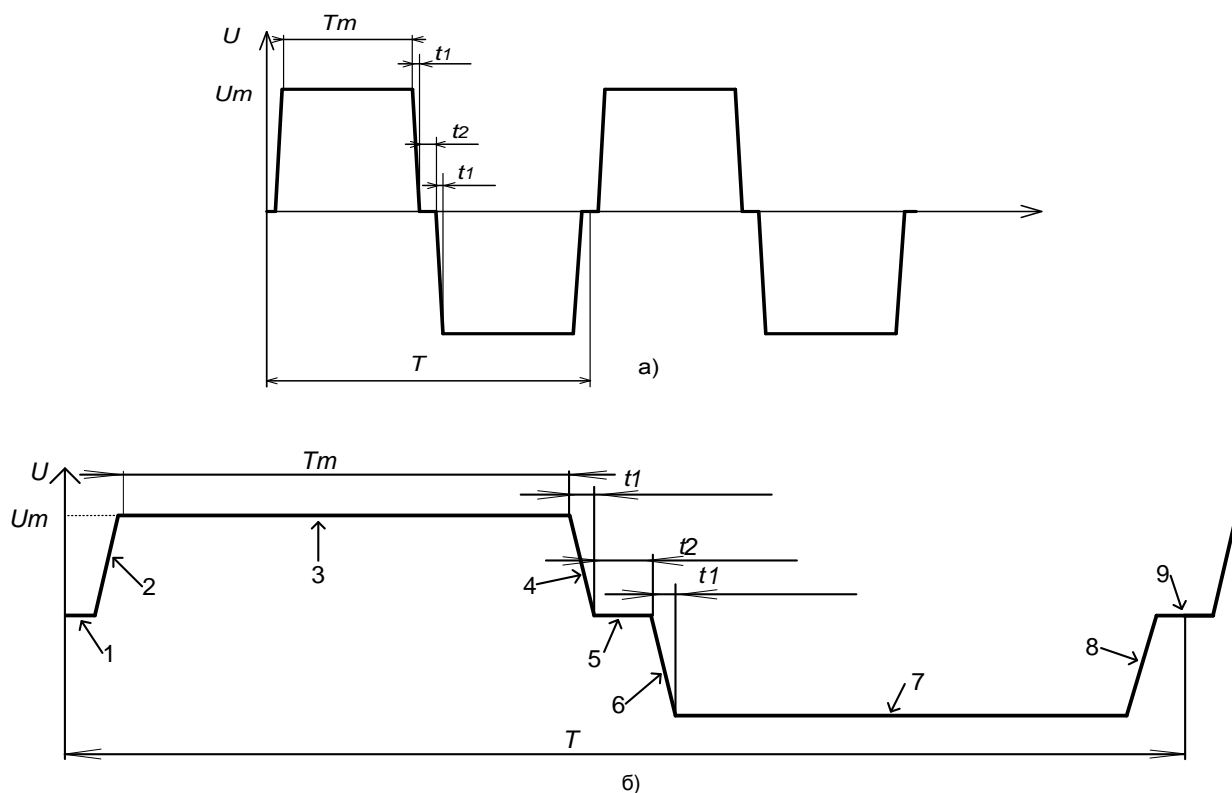


Рис. 2.2. Стилизованная осциллограмма (а) и параметры ЭДС (б) транзисторного преобразователь напряжения $U(t)$ «трапеция с паузой»; длительность амплитудного значения $T_m = (T - 2t_2)$ причем, $\tau = 2t_1 + t_2$; U_m – амплитудное значение ЭДС

Были составлены выражения для вычисления интегралов формулы (2.14) на каждом участке [83]:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= 0 \cdot \int_0^{\frac{t_2}{2}} \sin(2\pi k f_1 \cdot t) \cdot dt = 0; & I_2 &= \int_{\frac{t_2}{2}}^{\frac{t_2}{2} + t_1} \left(\frac{t - \frac{t_2}{2}}{t_1} \right) \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt; \\
 I_3 &= \int_{\frac{t_2}{2} + t_1}^{\frac{t_2}{2} + t_1 + t_m} \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt; & I_4 &= \int_{\frac{t_2}{2} + t_1 + t_m}^{\frac{t_2}{2} + 2t_1 + t_m} \left(\frac{1 - \left(t - \left(t_1 + \frac{t_2}{2} + t_m \right) \right)}{t_1} \right) \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt;
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Продолжение

$$I_5 = 0 \cdot \int_{\frac{t_2}{2} + 2t_1 + t_m}^{\frac{3t_2}{2} + 2t_1 + t_m} \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt = 0;$$

$$I_6 = \int_{\frac{3t_2}{2} + 2t_1 + t_m}^{\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + t_m} \left(-1 \left(\frac{t - \left(2t_1 + \frac{3t_2}{2} + t_m \right)}{t_1} \right) \right) \sin(2\pi k f_1 \cdot t);$$

$$I_7 = \int_{\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + t_m}^{\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m} (-1) \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt;$$

$$I_8 = \int_{\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m}^{\frac{3t_2}{2} + 4t_1 + 2t_m} \left(\left(\frac{t - 3t_1 - \frac{3t_2}{2} - 2t_m}{t_1} \right) - 1 \right) \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt;$$

$$I_9 = 0 \cdot \int_{\frac{3t_2}{2} + 4t_1 + 2t_m}^{t_2 + 4t_1 + 2t_m} \sin(2\pi k f_1 \cdot t) dt = 0.$$

Как следует из (2.15), три слагаемые формулы (2.14).

$$I_1 = I_5 = I_9 = 0, \quad (2.16)$$

Что упрощает использование соотношения (2.14). Для вычисления определенных интегралов I_3 и I_7 можно применить известную формулу [84,85]:

$$\int_{t_1}^{t_2} a \cdot \sin(bt) dt = \int_{t_1}^{t_2} -a \cdot \frac{\cos(bt)}{b} = \frac{a}{b} [\cos(bt_1) - \cos(bt_2)]. \quad (2.17)$$

Интегралы I_4 , I_6 , I_8 можно свести к следующему виду [84,85]

$$\int_{t_1}^{t_2} (t-a) \cdot \frac{\sin(b \cdot t)}{c} dt = \frac{2a \cdot \sin\left(\frac{b \cdot t_1}{2}\right)^2}{b \cdot c} - \frac{\sin(b \cdot t_1) + b \cdot t_1 \cdot \left(2 \cdot \sin\left(\frac{b \cdot t_1}{2}\right)^2 - 1\right)}{b^2 \cdot c} + \frac{\sin(b \cdot t_2) + b \cdot t_2 \cdot \left(2 \cdot \sin\left(\frac{b \cdot t_2}{2}\right)^2 - 1\right)}{b^2 \cdot c} \quad (2.18)$$

С учетом (2.17) и (2.18) выражения (2.15) приобретает вид

$$I_2 = \frac{2 \frac{t_2}{2} \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} \right)}{2} \right)^2}{(2\pi k f_1) \cdot t_1} -$$

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

$$+ \frac{\sin \left((2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right) \right) + (2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right) \cdot \left(2 \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right)}{2} \right)^2 - 1 \right)}{(2\pi k f_1)^2 \cdot t_1},$$

$$I_3 = \frac{1}{(2\pi k f)} \left[\cos \left((2\pi k f) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 \right) \right) - \cos \left((2\pi k f) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 + t_m \right) \right) \right],$$

(2.19)

$$I_4 = \frac{2 \left(t_1 + \frac{t_2}{2} + t_m + 1 \right) \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 + t_m \right)}{2} \right)^2}{(2\pi k f_1) \cdot (-t_1)} -$$

$$- \frac{\sin \left((2\pi k f_1) \cdot t_1 \right) + (2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 + t_m \right) \cdot \left(2 \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + t_1 + t_m \right)}{2} \right)^2 - 1 \right)}{(2\pi k f_1)^2 \cdot (-t_1)} +$$

$$+ \frac{\sin \left((2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + 2t_1 + t_m \right) \right) + (2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + 2t_1 + t_m \right) \cdot \left(2 \cdot \sin \left(\frac{(2\pi k f_1) \cdot \left(\frac{t_2}{2} + 2t_1 + t_m \right)}{2} \right)^2 - 1 \right)}{(2\pi k f_1)^2 \cdot (-t_1)},$$

продолжение

$$\begin{aligned}
I_6 = & \frac{2\left(2t_1 + \frac{3t_2}{2} + t_m\right) \cdot \sin\left(\frac{(2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 2t_1 + t_m\right)}{2}\right)^2}{(2\pi kf_1) \cdot t_1} - \\
& \frac{\sin\left((2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 2t_1 + t_m\right)\right) + (2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 2t_1 + t_m\right) \cdot \left(2 \cdot \sin\left(\frac{(2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 2t_1 + t_m\right)}{2}\right) - 1\right)}{(2\pi kf_1)^2 \cdot t_1} + \\
& \frac{\sin\left((2\pi kf_1) \cdot t_2\right) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + t_m\right) + (2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + t_m\right) \cdot \left(2 \cdot \sin\left(\frac{(2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + t_m\right)}{2}\right) - 1\right)}{(2\pi kf_1)^2 \cdot t_1}, \\
I_7 = & \frac{-1}{(2\pi kf)} \left[\cos\left((2\pi kf) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + t_m\right)\right) - \cos\left((2\pi kf) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m\right)\right) \right], \\
I_8 = & \frac{2\left(3t_1 + \frac{3t_2}{2} - 2t_m - t_1\right) \cdot \sin\left(\frac{(2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m\right)}{2}\right)^2}{(2\pi kf_1) \cdot t_1} - \\
& \frac{\sin\left(2\pi(2k-1)f_1 \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m\right)\right) + (2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m\right) \cdot \left(2 \cdot \sin\left(\frac{(2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 3t_1 + 2t_m\right)}{2}\right) - 1\right)}{(2\pi kf_1)^2 \cdot t_1} + \\
& \frac{\sin\left((2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 4t_1 + 2t_m\right)\right) + (2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 4t_1 + 2t_m\right) \cdot \left(2 \cdot \sin\left(\frac{(2\pi kf_1) \cdot \left(\frac{3t_2}{2} + 4t_1 + 2t_m\right)}{2}\right) - 1\right)}{(2\pi kf_1)^2 \cdot t_1}
\end{aligned}$$

Полученные выражения (2.19) позволяют при определении амплитуды гармоник ЭДС с помощью формулы (2.14) полностью отказаться от процедуры численного интегрирования, что позволит многократно ускорить вычисления и повысить их точность [83].

2.2. Разработка методики электрического расчета установившихся режимов магистральной схемы электроснабжения повышенной частоты

Предложенная ранее методика электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ в виде радиальной высоковольтной линии электроснабжения с питанием от мощного транзисторного преобразователя (рис. 1.8) [16,27], предполагает наличие в этом устройстве одной высоковольтной кабельной линии, включенной между источником питания и электроприемником без дополнительных присоединений к линии в промежуточных точках. Такая методика не может быть применима к случаю, когда на кабельной линии в промежуточных точках дополнительно подключаются новые электроприемники, т.е. получается линия электроснабжения магистрального типа (рис. 1.7). Учитывая широкое распространение таких систем электроснабжения на практике существует потребность в разработке расчетной методики применительно к этому случаю.

На рис. 2.3. представлена схема ЭТКПЧ магистрального типа в общем случае, когда она содержит n электроприемников. При этом все электроприемники, кроме последнего (n -го), подключены к промежуточным точкам высоковольтной кабельной линии.

Общая для всех электроприемников кабельная линия состоит из n участков, соединенных последовательно. На всех участках кабель имеет произвольные значения длины, конструктивное выполнение, параметры. Кроме одного повышающего трансформатора Tr_1 , в каждой точке

подключения предполагается наличие понижающего трансформатора $Tr.2 \div Tr.n+1$, который также может иметь произвольное конструктивное выполнение, мощность и параметры. Сопротивление нагрузки, подключенное ко вторичной обмотке, может иметь произвольную величину и характер.

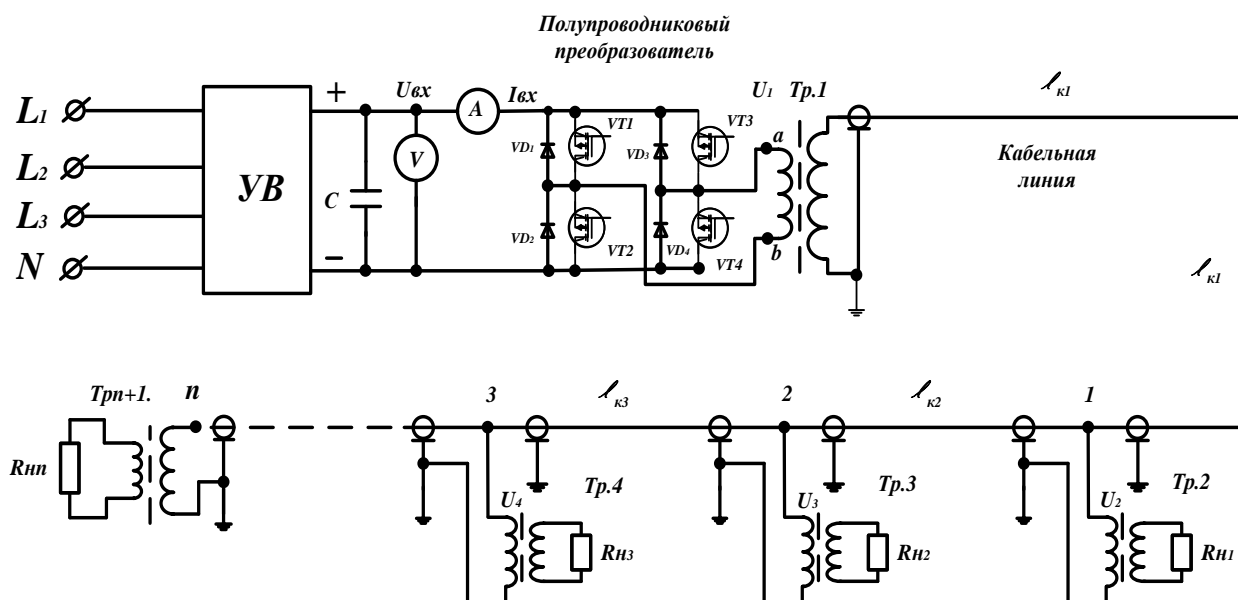


Рис. 2.3. Электрическая схема ЭТКПЧ в виде системы электроснабжения магистрального типа: УВ – трехфазный управляемый выпрямитель напряжения питающей сети 50 Гц; VT_{1-4} – силовые IGBT транзисторы; $Tr.1$ – повышающий высоковольтный высокочастотный силовой трансформатор; $Tr.2 \div Tr.n+1$ – силовые высокочастотные понижающие трансформаторы; $R_{n1} \div R_{nm}$ – сопротивление нагрузки

Для выполнения электрических расчетов целесообразно использовать простой и наглядный прием, предложенный в [16,27] – последовательное свертывание схемы, перемещаясь от конца линии к источнику, с последующим разворачиванием в обратном направлении.

На основании электрической схемы установки рис. 2,3 составлена схема замещения, которая приведена на рис. 2.4 (в варианте с против-ЭДС). Свертывание схемы следует производить, начиная с конечной точки n (рис. 2.3) [82,86].

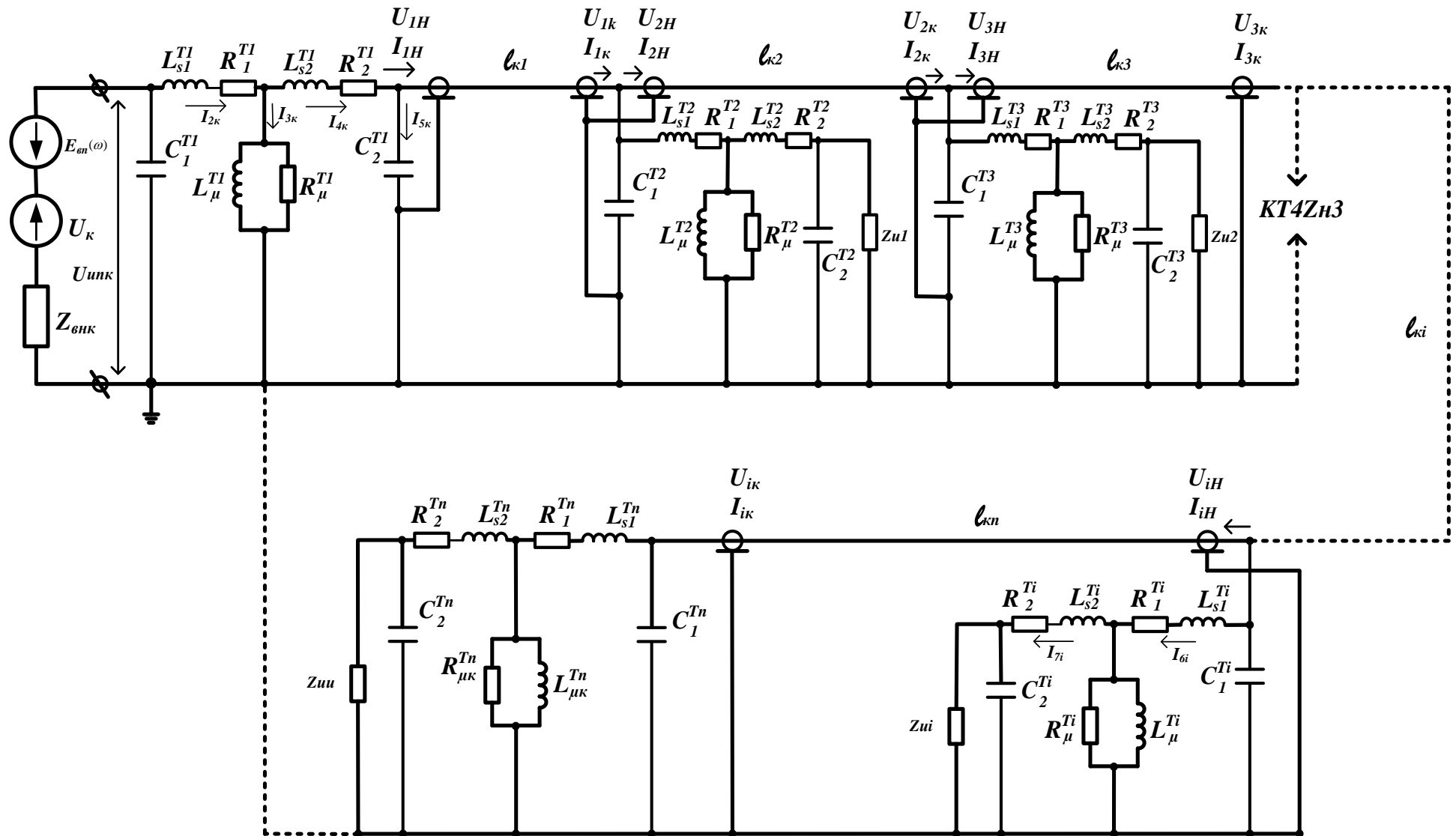


Рис. 2.4. Схема замещения высоковольтного ЭТКПЧ магистрального типа при произвольном количестве электроприемников

Действительно, на основании рис. 2.4 можно составить выражение для определения сопротивления в комплексной форме $Z_{вых.n}$ относительно зажимов кабеля в конце последнего (n -го) участка кабельной линии [16,27,82,86] следующим образом: раздел 2.20 и 2.21

$$Z_{вых.n} = \frac{Z_5 \cdot j \frac{1}{\omega_k C_2^{Tn}}}{j \frac{1}{\omega_k C_2^{Tn}} - Z_5}, \quad (2.20)$$

где

$$Z_5 = R_2^{Tn} + j\omega_k L_{s2}^{Tn} + Z_4 ;$$

$$Z_4 = \frac{Z_3 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3} ;$$

$$Z_3 = \frac{R_{\mu k}^{Tn} \cdot j\omega_k L_{\mu k}^{Tn}}{R_{\mu k}^{Tn} + j\omega_k L_{\mu k}^{Tn}} ; \quad (2.21)$$

$$Z_2 = Z_1 + R_1^{Tn} + j\omega_k L_{s1}^{Tn} ;$$

$$Z_1 = \frac{Z_{un} \cdot j \frac{1}{\omega_k \cdot C_1^{Tn}}}{j \frac{1}{\omega_k \cdot C_1^{Tn}} - Z_{un}}$$

R_1^{Tn} и R_2^{Tn} - активные сопротивления низковольтной и высоковольтной обмоток, соответственно, трансформатора $Tr.n$; L_{s1}^{Tn} и L_{s2}^{Tn} - индуктивности рассеяния этих обмоток; $R_{\mu k}^{Tn}$ - величина активного сопротивления, отражающего потери мощности в магнитопроводе силового трансформатора Tn для k -ой гармоники; $L_{\mu k}^{Tn}$ - индуктивность намагничивания магнитопровода для k -ой гармоники этого трансформатора, $R_{\mu k}^{Tn}$ и $L_{\mu k}^{Tn}$ - вычисляются по методике, изложенной в [16], C_1^{Tn} и C_2^{Tn} - ёмкости первичной и вторичной обмоток трансформатора $Tr.n$ относительно земли, $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi f_1(2k-1)$.

При выполнении расчетов по схеме замещения рис. 2.4, кабельную линию длиной l_K в общем случае целесообразно рассматривать, как объект 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 [16,31,34]:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l_K + \dot{I}_2 z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_K; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l_K + \frac{\dot{U}_2}{z} \operatorname{sh} \gamma l_K,\end{aligned}\tag{2.22}$$

или

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma l_K - \dot{I}_1 z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_K; \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma l_K - \frac{\dot{U}_1}{z} \operatorname{sh} \gamma l_K,\end{aligned}\tag{2.23}$$

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,

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}\tag{2.24}$$

– волновое сопротивление n -го участка линии,

$$\gamma = \alpha + j\beta,\tag{2.25}$$

$$\alpha = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0} \right)^2} - 1 \right]},\tag{2.26}$$

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

R_0 , L_0 и C_0 – погонные параметры линии: активное сопротивление, индуктивность и емкость изоляции, n -го участка кабельной линии.

При известном значении $Z_{\text{вых},n}$ (2.20) напряжение и ток в конце n -го участка кабельной линии связаны соотношением

$$U_{2n} = Z_{\text{вых},n} \cdot I_{2n},\tag{2.28}$$

где U_{2n} и I_{2n} напряжение и ток в конце n -го участка кабеля. Используя выражение (2.28) и заменяя в (2.22) и (2.23) \dot{U}_2 на U_{2n} , $\dot{U}_1 = U_{1n}$ и \dot{I}_1 на I_{2n} и $I_1 = I_{1n}$, систему уравнений (2.22) можно записать в следующем виде,

$$\begin{aligned} U_{1n} &= U_{2n} \left(ch\gamma_n \ell_{kn} + \frac{sh\gamma_n \ell_{kn}}{Z_{\text{вых.}n}} \right), \\ I_{1n} &= I_{2n} \left(ch\gamma_n \ell_{kn} + \frac{Z_{\text{вых.}n}}{Z_n} sh\gamma_n \right), \end{aligned} \quad (2.29)$$

где ℓ_{kn} - длина линии, Z_n - волновое сопротивление, γ_n - постоянная распространения электромагнитной волна n -го участка кабельной линии. Разделив левые и правые части уравнений (2.29) друга получаем формулу для определения сопротивления на входных зажимах n -го участка кабельной линии:

$$Z_{\text{вх.}n} = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} = Z_{\text{вых.}n} \frac{ch\gamma_n \ell_{kn} + \frac{sh\gamma_n \ell_{kn}}{Z_{\text{вых.}n}}}{ch\gamma_n \ell_{kn} + \frac{Z_{\text{вых.}n}}{Z_n} sh\gamma_n}. \quad (2.30)$$

Тогда величина сопротивления, включенного на конце $n-1$ участка (рис.2.4) определится посредством сложения сопротивления нагрузки Z_{n-1} в этой точке с учетом силового трансформатора Tr_{n-1} и сопротивления $Z_{\text{вх.}n}$:

$$Z_{\text{вых.}n-1} = \frac{Z_6 \cdot Z_{\text{вх.}n}}{Z_6 + Z_{\text{вх.}n}}, \quad (2.31)$$

где

$$Z_6 = \frac{Z_5 \cdot j \frac{1}{\omega_k C_2^{T_{n-1}}}}{j \frac{1}{\omega_k C_2^{T_{n-1}}} - Z_5};$$

$$Z_5 = R_2^{T_{n-1}} + j\omega_k \cdot L_{s2}^{T_{n-1}} + Z_4; \quad (2.32)$$

$$Z_4 = \frac{Z_3 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3};$$

$$Z_3 = \frac{R_{\mu k}^{T_{n-1}} \cdot j\omega_k \cdot L_{\mu k}^{T_{n-1}}}{R_{\mu k}^{T_{n-1}} + j\omega_k \cdot L_{\mu k}^{T_{n-1}}};$$

продолжение

$$Z_2 = Z_1 + R_1^{Tn-1} + j\omega_k \cdot L_{s1}^{Tn-1};$$

$$Z_1 = \frac{Z_{nn-1} j \frac{1}{\omega_k C_1^{Tn-1}}}{j \frac{1}{\omega_k C_1^{Tn-1}} - Z_{nn-1}};$$

Далее по аналогии с (2.30) можно получить формулу для определения сопротивления на входе $n-1$ участка:

$$Z_{ex.n-1} = \frac{U_{1n-1}}{I_{1n-1}} = Z_{вых.n-1} \frac{ch\gamma_{k-1} \ell_{kn-1} + \frac{sh\gamma_n \ell_{kn-1}}{Z_{вых.n-1}}}{ch\gamma_{n-1} \ell_{kn-1} + \frac{Z_{вых.n-1}}{Z_{n-1}} sh\gamma_{n-1} \ell_{kn-1}} \quad (2.33)$$

Вычисления для последующих точек подключения нагрузки (например, для i – ой точки) будут иметь такой же порядок, как и в месте $n-1$ -го присоединения. Для этих расчетов можно применять формулы (2.30) ÷ (2.33), указав вместо индекса $n-1$ индекс i , а вместо $n - i + 1$.

В конечном итоге будет получено значение сопротивление относительно входных зажимов первого участка $Z_{вх.1}$, это позволяет посредством последовательных вычислений определить величину эквивалентного сопротивления Z_9 относительно зажимов преобразователь напряжения:

$$Z_7 = \frac{Z_{ex.1} \cdot j \frac{1}{\omega_k C_2^{T1}}}{Z_{ex.1} - j \frac{1}{\omega_k C_2^{T1}}},$$

$$Z_8 = Z_7 + R_2^{T1} + j\omega_k L_{s2}^{T1},$$

$$Z_9 = \frac{R_{\mu k}^{T1} \cdot j\omega_k L_{\mu k}^{T1}}{R_{\mu k}^{T1} + j\omega_k L_{\mu k}^{T1}}, \quad (2.34)$$

$$Z_{10} = \frac{Z_8 \cdot Z_9}{Z_8 + Z_9},$$

$$Z_{11} = R_1^{T1} + j\omega_k L_{s1}^{T1} + Z_{10},$$

$$Z_9 = \frac{Z_{11} \cdot j \frac{1}{\omega_k C_1^{T1}}}{Z_{11} - j \frac{1}{\omega_k C_1^{T1}}}.$$

Далее определяется величина тока k -ой гармоники, протекающей через преобразователь напряжения, с использованием скорректированного значения внутреннего сопротивления (2.10) источника (либо с учетом противо-ЭДС):

$$I_{1k} = \frac{U_k}{Z_{\text{внк}} + Z_{\text{с}}} \quad (2.35)$$

После этого производится развёртывание схемы замещения в обратном порядке с определением токов и напряжений k -ой гармоники в различных точках.

Действительно, зная величину I_{1k} (2.35), можно определить напряжение на зажимах преобразователя (рис. 2.4):

$$U_{\text{унк}} = U_k - I_{1k} \cdot Z_{\text{внк}}. \quad (2.36)$$

Затем с учетом соотношений (2.34) определяется ток в L_{s1}^{T1} и R_1^{T1}

$$I_{2k} = \frac{U_{\text{унк}}}{Z_{11}} \quad (2.37)$$

и напряжение в т. a (рис. 2.4):

$$U_{ak} = U_{\text{унк}} - I_{2k} \cdot (R_1^{T1} + j\omega_k L_{s1}^{T1}). \quad (2.38)$$

Это дает возможность определить величину тока в элементах R_2^{T1} и L_{s2}^{T1} :

$$I_{4k} = \frac{U_{ak}}{Z_8}, \quad (2.39)$$

а также значения напряжения

$$U_{\text{ex1}} = U_{ak} - I_{4k} \cdot (R_2^{T1} + j\omega_k L_{s2}^{T1}), \quad (2.40)$$

и тока

$$I_{\text{ex1}} = \frac{U_{\text{ex1}}}{Z_{\text{ex1}}} \quad (2.41)$$

на входе первого участка кабельной линии.

Используя уравнения длинной линии (2.23) нетрудно определить напряжение и ток на выходе первого участка кабельной линии:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вых.1}} &= U_{\text{ex1}} \operatorname{ch} \gamma_{1k} \cdot \ell_{k1} - I_{\text{ex1}} \cdot Z_1 \operatorname{sh} \gamma_{1k} \ell_{k1}, \\
 I_{\text{вых.1}} &= I_{\text{ex1}} \operatorname{ch} \gamma_{1k} \cdot \ell_{k1} - \frac{U_{\text{ex1}}}{Z_1} \cdot \operatorname{sh} \gamma_{1k} \ell_{k1}.
 \end{aligned}
 \tag{2.42}$$

Таким образом, начиная с первой точки подключения электроприёмников и далее, вычисления производятся с помощью одной и той же процедуры. Для произвольного i -го участка кабельной линии с учетом приведенных выше соотношений будут справедливы следующие выражения

$$\begin{aligned}
 U_{\text{exi}} &= U_{\text{выхi-1}}; \\
 I_{\text{exi}} &= \frac{U_{\text{выхi-1}}}{Z_{\text{exi}}};
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

$$\begin{aligned}
 U_{\text{выхi}} &= U_{\text{exi}} \cdot \operatorname{ch} \gamma_{ik} \ell_{ki} - I_{\text{exi}} \cdot Z_i \operatorname{sh} \gamma_{ik} \cdot \ell_{ki}, \\
 I_{\text{выхi}} &= I_{\text{exi}} \cdot \operatorname{ch} \gamma_{ik} \ell_{ki} - \frac{U_{\text{exi}}}{Z_i} \operatorname{sh} \gamma_{ik} \cdot \ell_{ki}.
 \end{aligned}
 \tag{2.44}$$

Выражения (2.43) и (2.44) позволяют последовательно рассчитать величину напряжения k -ой гармоника во всех точках подключения нагрузки (электроприёмников):

$$U_{ik} = U_{\text{выхi-1}} = U_{\text{exi}}. \tag{2.45}$$

Это даёт возможность, используя соотношения вида (2.21), определить значения напряжения U_{ni} и тока I_{ni} нагрузки k -ой гармоника в каждой точке подключения:

$$\begin{aligned}
 I_{6i} &= \frac{U_{ik}}{Z_5}; \\
 I_{7i} &= \frac{U_{ik} - I_{6i} (R_2^{Ti} + j\omega_k L_{s2}^{Ti})}{Z_2};
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

$$U_{ni} = U_{ik} - I_{6i} (R_2^{Ti} + j\omega_k L_{s2}^{Ti}) - I_{7i} (R_1^{Ti} + j\omega_k L_{s1}^{Ti});$$

$$I_{ni} = \frac{U_{ni}}{Z_{ni}}.$$

Вполне очевидно, что могут быть определены значения токов и напряжений в точках и элементах (рис. 2.4), не упомянутых выше. Кроме этого, по известным значениям токов можно рассчитать величину активной и реактивной мощности, а также величину их потерь с получением значений КПД [79,86].

Особенность описанной выше процедуры вычислений заключается в том, что в результате ее применения определяются амплитудные значения токов $I_{k,j}^m$ и напряжений $U_{k,j}^m$ каждой гармоники разложения в различных точках схемы замещения (рис. 2.4) поскольку по формуле (2.14) определяются именно амплитудные значения гармоник, на которые раскладывается кривая ЭДС и которые затем используются для электрического расчета. При определении энергетических показателей ЭТКПЧ удобнее пользоваться эффективными значениями напряжений $U_{k,j}$ и токов $I_{k,j}$ в элементах этой схемы замещения (j – номер элемента), которые, как известно [30÷33], для синусоидальных токов и напряжений определяются с использованием соотношений

$$U_{k,j} = \frac{U_{k,j}^m}{\sqrt{2}}, \quad I_{k,j} = \frac{I_{k,j}^m}{\sqrt{2}}. \quad (2.47)$$

В итоге, результаты расчетов токов и напряжений в схеме замещения (рис. 2.4) позволяют определить активную мощность, потребляемую нагрузкой посредством суммирования мощности всех гармоник [28,32,79,86]:

$$P_H = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{\infty} P_{k,i} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{\infty} U_{k,i} I_{k,i} \cos \varphi_{k,i}, \quad (2.48)$$

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 (2.48) принимает более простой вид:

$$P_H = \sum_{i=1}^M \frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_{k,i}^2}{R_{H,i}}, \quad (2.49)$$

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

Мощность потерь электрической энергии в электропередаче или электрической сети можно определить суммированием потерь, вызванных токами всех гармоник в активных сопротивлениях всех элементов схемы замещения за исключением нагрузки:

$$\Delta P = \Delta P_{\Sigma\mu} + \sum_{j=1}^{L-M} \sum_{k=1}^{\infty} \Delta P_{k,j} = \Delta P_{\Sigma\mu} + \sum_{j=1}^{L-M} \sum_{k=1}^{\infty} I_{k,j}^2 R_{k,j}, \quad (2.50)$$

где

$$\Delta P_{k,j} = I_{k,j}^2 R_{k,j}, \quad (2.51)$$

$\Delta P_{k,j}$ – 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 и эффекта «близости», например, по методике, изложенной в [27],

$$\Delta P_{\Sigma\mu} = \sum_{n=1}^{N_{TP}} \Delta P_{n\mu} \quad (2.52)$$

– 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 [26÷28,32,72,86] можно определить посредством

суммирования мощности потерь, обусловленных всеми гармониками, по формуле

$$\Delta P_{n\mu} = 1.64 \cdot 10^{-3} m \sum_{k=1}^{\infty} f_k^{1,31} B_k^{2,49}, \quad (2.53)$$

где m – масса магнитопровода n -го трансформатора; B_k – индукция магнитного поля в магнитопроводе для k -ой гармоники определяется с использованием методики, изложенной в [27,31], по известной величине амплитуды напряжения этой гармоники $U_{n,k}$, обмоточным данным и параметрам магнитопровода силового трансформатора.

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 3-х фазного напряжения промышленной частоты, к которым одновременно подключена электрическая емкость для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и замыкания токов повышенной частоты [35,37,38,59]. 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 [16,25,27,35]. Важными паспортными параметрами силовых транзисторов являются падение напряжения на переходе эмиттер-коллектор в открытом состоянии ΔU_T и величина постоянного тока коллектора $I_{\kappa 0}$, при которой определяется это падение напряжения. Наличие этих параметров позволяет определить величину сопротивления транзистора в открытом состоянии:

$$R_T = \frac{\Delta U_T}{I_{\kappa 0}}, \quad (2.54)$$

Значение R_T определяется конструктивным выполнением транзистора, параметрами используемых при этом полупроводниковых материалов, свойствами коллекторного и эмиттерного переходов [36,37], и можно

предположить, что величина этого сопротивления не будет зависеть от частоты протекающего тока. Как было отмечено в гл. 1, в мощных электроэнергетических и электротехнических установках обычно применяются полупроводниковые преобразователи напряжения, собранные по мостовой схеме [26,27,37] (рис. 1.12). Согласно принципа действия таких устройств [37] в каждый момент времени последовательно с электропередачей оказываются, включены два транзистора, и мощность потерь энергии в преобразователе можно определить суммированием потерь, обусловленных всеми гармониками тока $I_{k,T}$ в транзисторах:

$$\Delta P_{\Pi} = 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_{k,T}^2 R_T = 2 R_T \sum_{k=1}^{\infty} I_{k,T}^2, \quad (2.55)$$

Знание мощности в нагрузке (2.48), (2.49) и мощности потерь энергии согласно (2.51), (2.52) и (2.55) позволяет определять коэффициент полезного действия (КПД) ЭТКПЧ:

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Delta P + \Delta P_{\Pi}}. \quad (2.56)$$

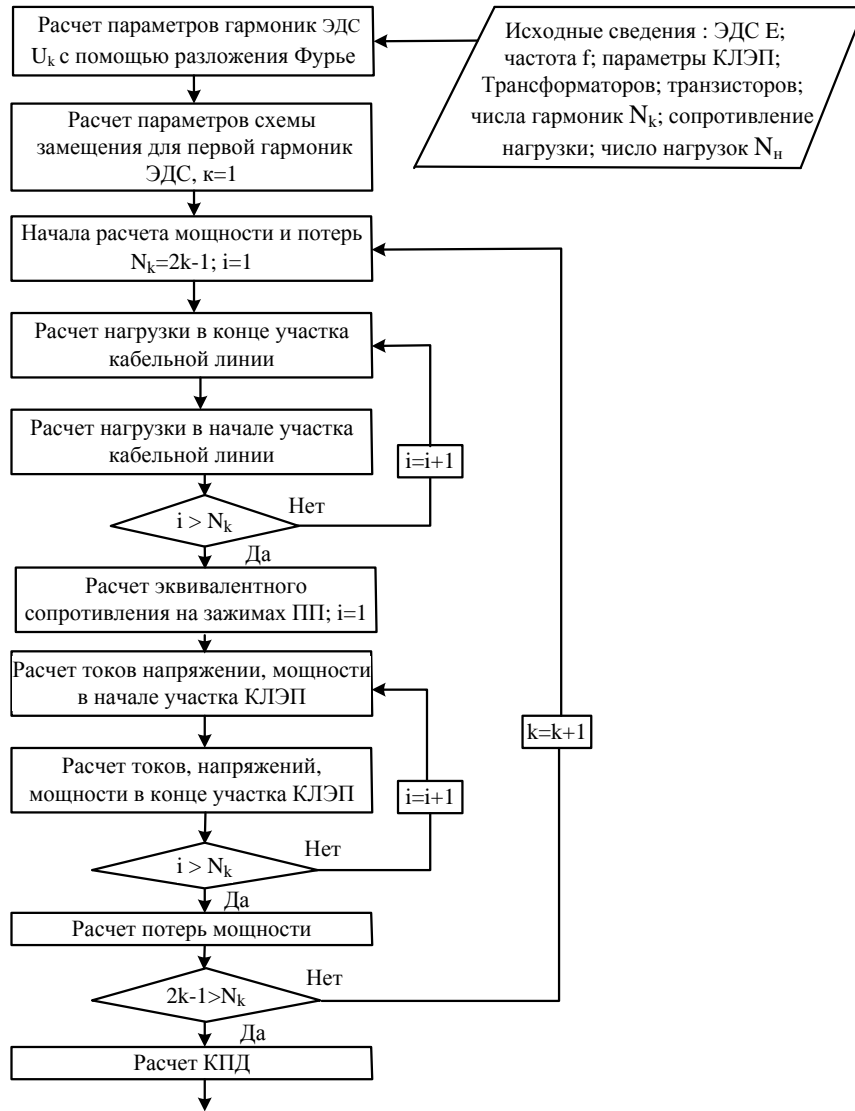
Кроме этого, не составляет труда определить отдельно КПД преобразователя напряжения:

$$\eta_{\Pi} = \frac{P_H + \Delta P}{P_H + \Delta P + \Delta P_{\Pi}}, \quad (2.57)$$

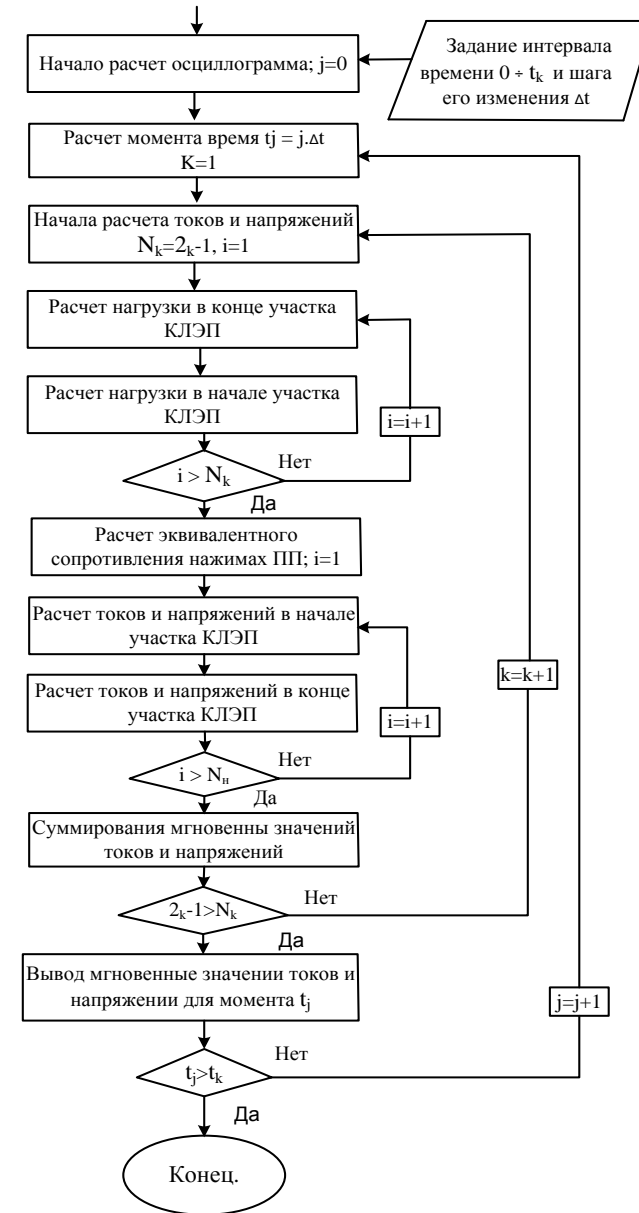
а также КПД электропередачи (электрической системы) без учета преобразователей напряжения:

$$\eta_{ЭП} = \frac{P_H}{P_H + \Delta P}. \quad (2.58)$$

На основании рассмотренной методики электрического расчета ЭТКПЧ в виде магистральной линии электроснабжения была разработана ее программно–алгоритмическая реализация. На рис. 2.5 представлена блок-схема электрического расчета ЭТКПЧ с использованием предложенной методики.



а)



б)

Рис. 2.5. Блок-схема электрического расчета ЭТКПЧ магистрального типа, в установившемся режиме работы

Согласно рис. 2.5 процесс вычислений состоит из двух основных частей. В первой из них (рис. 2.5,а) выполняется вычисление амплитуды гармоник разложения Фурье кривой изменения ЭДС во времени (рис. 2.2) с использованием (2.2) и (2.19). Затем производится расчет токов и напряжений, а также потерь мощности в элементах схемы замещения (рис. 2.4) для каждой гармоники разложения с помощью методики, рассмотренной в настоящем разделе. Завершается первая часть вычислением КПД ЭТКПЧ и его отдельных частей.

Во второй части (рис. 2.5,б) производится расчет и построение осциллограмм тока и напряжения (мощности) посредством пошагового (во времени) вычисления мгновенных значений этих параметров при изменении времени t от нуля до значения $t=(2\div 3)T$.

2.3. Методика расчета параметров высоковольтных кабельных линий повышенной частоты.

Обязательным элементом электротехнических комплексов повышенной частоты являются высоковольтные кабельные линии, параметры которых оказывают значительное влияние на установившиеся режимы работы и эксплуатационные характеристики ЭТКПЧ. Удобные для применения в таких устройствах кабели типа КВСП-М или некоторые типы радиочастотных кабелей РК-75 имеют важный недостаток – высокое значение электрической емкости изоляции, что приводит к большим значениям реактивной мощности в высоковольтной кабельной линии и ухудшению характеристик ЭТКПЧ. Кроме этого, при такой конструкции кабеля затруднено создание линий с управляемыми параметрами для достижения рациональных режимов работы ЭТКПЧ.

В целях устранения этих недостатков необходимо рассмотреть возможность применения в составе ЭТКПЧ двухпроводных кабельных линий

с общим экраном [87]. Такие кабельные линии могут быть выполнены с литой (твердой) или воздушной изоляцией. Возможные варианты конструктивного выполнения кабельных линий представлены на рис. 2.6.

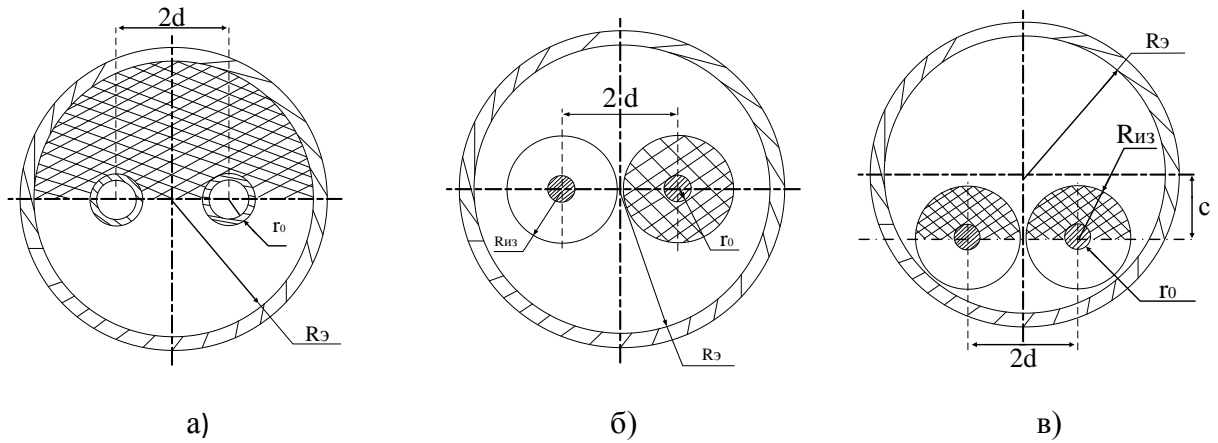


Рис. 2.6. Конструктивные варианты двухпроводной кабельной линии в поперечном сечении

Двухпроводные кабельные линии предоставляют возможность создания управляемых электропередач [17,26,34], которые могут быть настроены на различные режимы работы. В этом случае возможный вариант исполнения ЭТКПЧ будет выглядеть согласно рис. 2.7:

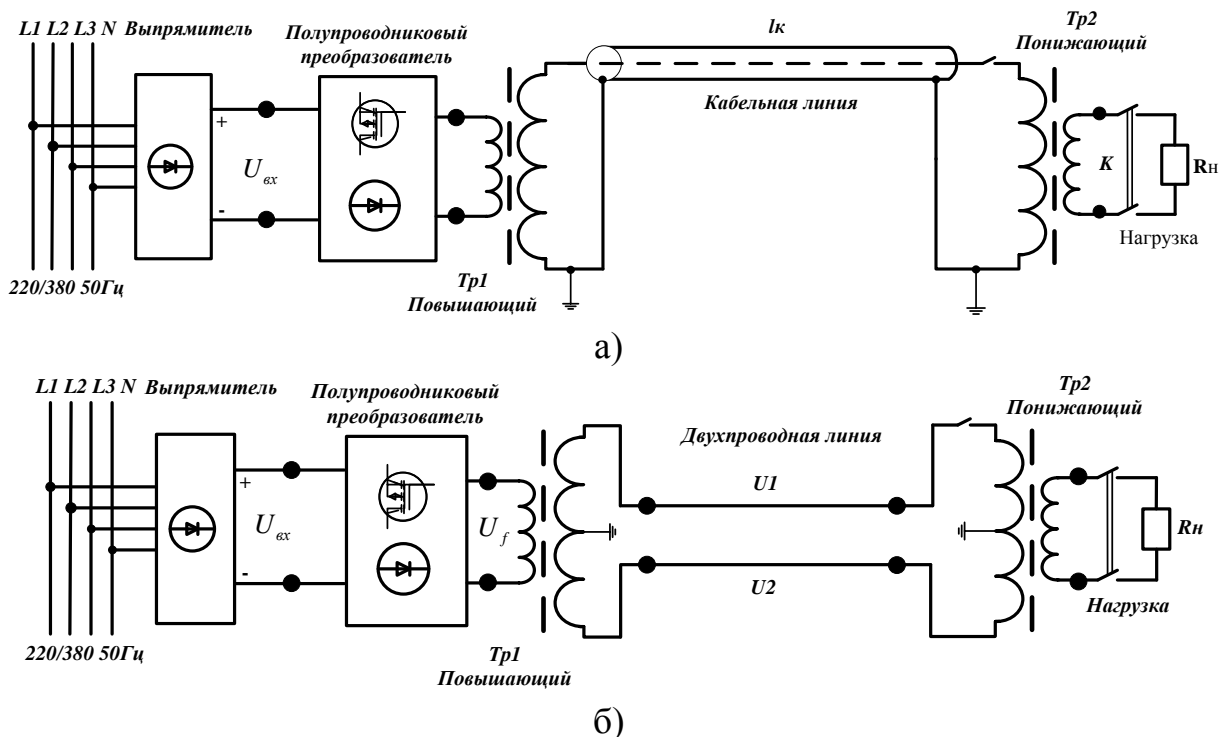


Рис. 2.7. Варианты исполнения ЭТКПЧ на основе полупроводниковых преобразователей напряжения, использующих IGBT транзисторы, с коаксиальной кабельной линией (а), двухпроводной линией (б) (в экране)

Для расчета параметров кабельных линий можно воспользоваться существующими соотношениями [34,68,112].

Для определения погонной ёмкости двухпроводного кабеля в однородной среде (рис. 2.6,а) можно воспользоваться формулой [112]:

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \left(\frac{R^2 - d^2}{R^2 + d^2} \cdot \frac{2d}{r} \right)} \quad (2.59)$$

– с учетом фазового сдвига в 180 градусов между напряжениями U_1 и U_2 (рис. 2.7,б).

Погонная индуктивность двухпроводного экранированного кабеля рассчитывается [88]:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{2d}{r_0} + \frac{1}{4} \right) \pm \ln \left(\frac{\sqrt{R_3^4 + d^4 + 2d^2 R_3^2}}{R_3^2 - d^2} \right) \right), \quad (2.60)$$

где знак «+» соответствует случаю, когда экран выполнен из магнитного материала, а «-» из немагнитного.

Волновое сопротивление кабеля, как известно, может быть рассчитано:

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (2.61)$$

Более сложным является случай, когда проводники двухпроводной линии имеют твёрдую изоляцию и расположены в заполненной воздухом проводящей оболочке (рис. 2.6,б). Частным случаем такого варианта является расположение этих проводников лежащими на экране (рис. 2.6,в).

В отношении двухпроводных линий необходимые параметры могут быть определены посредством решения системы потенциальных уравнений [31,34]

$$\begin{cases} U_1 = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2 \\ U_2 = \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2 \end{cases}, \quad (2.62)$$

где $\alpha_{11} = \alpha_{22}$ - собственные потенциальные коэффициенты, $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ - взаимные потенциальные коэффициенты, q_1, q_2 - погонный заряд на

проводниках, а напряжение на втором проводнике можно выразить через напряжение на первом:

$$U_2 = U_1 \cdot \cos \psi, \quad (2.63)$$

где ψ – угол сдвига по фазе между напряжениями U_1 и U_2 может плавно регулироваться в пределах от 0 до π , с помощью системы управления, входящей в состав полупроводникового преобразователя напряжения (рис. 2.7,б).

В результате решения системы уравнений (2.62) могут быть получены выражения для определения фазной емкости C_1, C_2 :

$$C_0 = C_1 = C_2 = \frac{q_1}{U_1} = \frac{q_2}{U_2} = \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12} \cos \psi}{\alpha_{11}^2 - \alpha_{12}^2} \quad (2.64)$$

Таким образом, для вычисления емкостей необходимо знание потенциальных коэффициентов.

Для инженерных расчетов потенциальные коэффициенты могут быть вычислены с применением метода эквивалентных зарядов [31,89)]. 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. На рис. 2.8. представлена схема, иллюстрирующая методику расчета.

Для проводов расчетной схемы (рис. 2.8) справедлива формула Остроградского-Гаусса [31], позволяющая определять напряженность электрического поля в любой точке окружающего пространства:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad (2.65)$$

где $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ - диэлектрическая проницаемость среды; q – погонный электрический заряд провода; r – расстояние от оси провода до рассматриваемой точки.

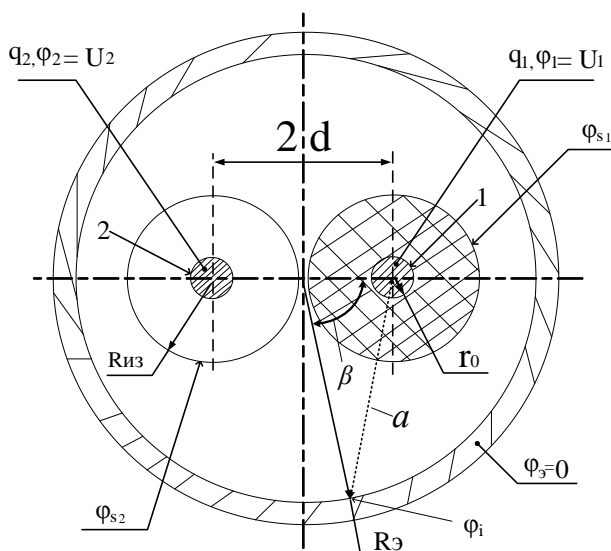


Рис. 2.8. Иллюстрация методики расчета погонной электрической емкости двухпроводной кабельной линии в экране

Посредством интегрирования соотношения (2.65) по направлению отрезка, a , учитывая, что относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_{r\phi}=1$, а также учитывая, что длина отрезка a (рис. 2.8) может быть определена по формуле

$$a = \sqrt{(R_{\phi} \cdot \sin \beta)^2 + (d - R_{\phi} \cdot \cos \beta)^2}, \quad (2.66)$$

можно определить разность потенциалов между потенциалом провода и потенциалом на внутренней поверхности экрана в точке, где заканчивается отрезок, a [31]:

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_{\phi i} &= \int_{r_0}^a E \cdot dr = \int_{r_0}^{R_{шз}} \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{r\phi}r} dr + \int_{R_{шз}}^a \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{r\phi}r} dr = \\ &= \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0} \left(\ln \frac{R_{шз}}{r_0} + \varepsilon_{r\phi} \ln \frac{a}{R_{шз}} \right) = \\ &= \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0} \left(\ln \frac{R_{шз}}{r_0} + \varepsilon_{r\phi} \ln \frac{\sqrt{(R_{\phi} \cdot \sin \beta)^2 + (d - R_{\phi} \cdot \cos \beta)^2}}{R_{шз}} \right), \end{aligned} \quad (2.67)$$

где r – текущее расстояние от оси провода до произвольной точки на отрезке a ; $\varepsilon_{r\phi}$ – относительная диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика.

Полученное соотношение (2.67) позволяет посредством интегрирования при перемещении точки, в которой заканчивается отрезок a , по окружности

внутренней поверхности экрана (рис. 2.8) с учетом симметрии этой конструкции относительно горизонтальной оси определить усредненное значение разности потенциала между проводом и экраном

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 - \varphi_3 &= \frac{1}{\pi} \int_{\beta=0}^{\pi} \varphi_{3i} d\beta = \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{\beta=0}^{\pi} \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \frac{R_{uz}}{r_0} + \epsilon_{r\partial} \ln \frac{\sqrt{(R_3 \cdot \sin \beta)^2 + (d - R_3 \cdot \cos \beta)^2}}{R_{uz}} \right) d\beta = \\
 &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \frac{R_{uz}}{r_0} + \frac{\epsilon_{r\partial}}{\pi} \int_{\beta=0}^{\pi} \ln \frac{\sqrt{(R_3 \cdot \sin \beta)^2 + (d - R_3 \cdot \cos \beta)^2}}{R_{uz}} d\beta \right).
 \end{aligned} \tag{2.68}$$

Учитывая, что потенциал первого провода равен величине напряжения на нем $\varphi_1 = U_1$, потенциал экрана равен нулю $\varphi_3 = 0$ (рис. 2.8), а также сопоставляя выражение (2.68) и систему уравнений (2.62) при $q_2 = 0$, нетрудно сделать вывод, что выражение, присутствующее в формуле (2.68) в качестве множителя при q_1 представляет собой соотношение, позволяющее определять величину собственных потенциальных коэффициентов, т.е.

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \frac{R_{uz}}{r_0} + \frac{\epsilon_{r\partial}}{\pi} \int_{\beta=0}^{\pi} \ln \frac{\sqrt{(R_3 \cdot \sin \beta)^2 + (d - R_3 \cdot \cos \beta)^2}}{R_{uz}} d\beta \right). \tag{2.69}$$

Более сложной задачей является определение взаимных потенциальных коэффициентов между проводниками расчетной схемы рис. 2.8. Вполне очевидно, что при наличии напряжения на первом проводнике и отсутствии его на другом и при $q_2 = 0$ второй проводник будет приобретать некоторый потенциал $\varphi_{12} < \varphi_1$ в электрическом поле, создаваемым зарядом первого проводника q_1 . В этом случае потенциалы первого и второго проводников будут связаны соотношением

$$\varphi_1 = \varphi_{12} + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3, \tag{2.70}$$

где

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_{S1} = \int_{r_0}^{R_{uz}} E \cdot dr = \int_{r_0}^{R_{uz}} \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{rd}r} dr = \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} \quad (2.71)$$

– разность между потенциалом первого проводника и потенциалом поверхности его твердого диэлектрика (рис. 3), определяется по аналогии с выражением (2.67);

$$\Delta\varphi_2 = \varphi_{S1} - \varphi_{S2} = \int_{R_{uz}}^{2d} E \cdot dr = \int_{R_{uz}}^{2d} \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0 r} dr = \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2d}{R_{uz}} \quad (2.72)$$

– разность между потенциалом поверхности твердого диэлектрика первого проводника и потенциалом поверхности твердого диэлектрика второго проводника (рис. 2.8), ее определение базируется на предположении о равномерном распределении связанного заряда по поверхности твердого диэлектрика, что дает основание расположить его на оси проводника;

$$\Delta\varphi_3 = \varphi_{S2} - \varphi_{12} \quad (2.73)$$

– разность между потенциалом поверхности твердого диэлектрика второго проводника и потенциалом второго проводника (рис. 2.8).

После подстановки выражения (2.73) в (2.70) и преобразований с учетом (2.62), (2.69), (2.71) и (2.72) получена следующая формула

$$\varphi_{S2} = \varphi_1 - \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = q_1 \left(\alpha_{11} - \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} - \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2d}{R_{uz}} \right). \quad (2.74)$$

Наличие потенциала на поверхности твердой изоляции второго провода (2.74) означает появление поляризации в диэлектрике и связанного заряда на его поверхности q_{12} [31,89]. Согласно теореме Остроградского-Гаусса, исходя из неизменности потока вектора электростатической индукции [31,89], на поверхности второго проводника должен существовать заряд такой же величины. Этот вывод не противоречит выше принятому условию – $q_2=0$, т.к. под действием внешнего электрического поля в металле происходит смещение электрических зарядов согласно направлению напряженности этого поля, а проводник в целом остается электрически нейтральным.

В целях получения окончательного решения необходимо определить величину q_{12} , для чего можно предположить, что в отсутствие заряда на первом проводе $q_1=0$ на втором существует потенциал φ_{12} , обусловленный зарядом q_{12} , которые согласно (2.62), учитывая, что $\alpha_{11}=\alpha_{22}$ вследствие симметричной конструкции кабеля (рис. 2.8), будут связаны между собой соотношением

$$\varphi_{12} = \alpha_{22}q_{12} = \alpha_{11}q_{12}. \quad (2.75)$$

Учитывая, что полярность φ_{12} и q_{12} противоположны полярности φ_1 и q_1 по аналогии с (2.68) и (2.71) можно определить разность потенциалов

$$\Delta\varphi_3 = \varphi_{S2} - \varphi_{12} = \int_{r_0}^{R_{uz}} E \cdot dr = \int_{r_0}^{R_{uz}} \frac{q_{12}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}r} dr = \frac{q_{12}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0}. \quad (2.76)$$

Поставляя (2.75) в (2.76), нетрудно определить потенциал на поверхности твердого диэлектрика второго провода:

$$\varphi_{S2} = \alpha_{11}q_{12} + \frac{q_{12}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} = q_{12} \left(\alpha_{11} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} \right). \quad (2.77)$$

Поскольку уравнения (2.74) и (2.77) выражают одну и ту же величину, приравняв правые части этих уравнений и решая полученное равенство относительно q_{12} можно получить следующее выражение:

$$q_{12} = \frac{q_1}{\left(\alpha_{11} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} \right)} \left(\alpha_{11} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2d}{R_{uz}} \right). \quad (2.78)$$

После подстановки выражения (2.78) для q_{12} в формулу (2.76) получена формула, устанавливающая связь между потенциалом второго провода и зарядом на первом

$$\varphi_{12} = \alpha_{11} \frac{q_1}{\left(\alpha_{11} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} \right)} \left(\alpha_{11} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rd}} \ln \frac{R_{uz}}{r_0} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2d}{R_{uz}} \right). \quad (2.79)$$

Анализ выражения (2.79) с точки зрения структуры потенциальных уравнений (2.62) позволяет сделать вывод, что множитель при q_1 в этом выражении представляет собой взаимный потенциальный коэффициент:

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{11} \frac{1}{\left(\alpha_{11} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r\partial}} \ln \frac{R_{из}}{r_0} \right)} \left(\alpha_{11} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{r\partial}} \ln \frac{R_{из}}{r_0} - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2d}{R_{из}} \right). \quad (2.80)$$

Таким образом, вычисляя значения собственных и взаимных коэффициентов по формулам (2.69) и (2.80), можно затем определить величину погонной емкости двухпроводной кабельной линии (рис. 2.6,б,в) с помощью формулы (2.64). При использовании формулы (2.69) для определения $\alpha_{11} = \alpha_{22}$ необходимо применять численное интегрирование, поэтому все расчеты удобно выполнять в среде Mathcad, а для случая, когда проводники в изоляции лежат на дне экрана (рис. 2.6,в), значение параметра d вычисляется по формуле

$$d = R_{э} - R_{из}. \quad (2.81)$$

В остальных случаях величина d определяется конструкцией кабеля (рис. 2.6,б,в).

Далее после расчета значения погонной индуктивности кабеля по формуле (2.60) определяется величина волнового его сопротивления с помощью соотношения (2.61). Таким образом, становятся известны все основные параметры высоковольтной кабельной линии, знание которых необходимо для электрического расчета установившихся режимов работы электротехнического комплекса (рис. 2.7) с помощью предложенной расчетной методики (разд. 2.2), основанной на применении принципов частотного анализа [16,27,32].

2.4. Выводы

По результатам выполненных теоретических разработок можно сделать следующие выводы.

1) На основании анализа существующих представлений и показателей распространения неосновных носителей заряда от эмиттерного к коллекторному переходу биполярного транзистора в открытом состоянии получено уточненное выражение для определения величины внутреннего сопротивления полностью открытого транзистора в зависимости от частоты гармоник разложения кривой ЭДС транзисторного преобразователя напряжения. Наличие такого выражения обязательно при выполнении электрического расчета установившихся режимов работы промышленной высоковольтной системы электроснабжения, когда источником питания является транзисторный преобразователь напряжения.

2) Получено аналитическое выражение для вычисления интеграла разложения Фурье при определении амплитуды гармоник, входящих в состав кривой ЭДС «трапеция с паузой» преобразователя, что позволяет преодолеть важнейший недостаток ранее предложенной методики электрического расчета радиальной схемы электроснабжения повышенной частоты, основанной на применении частотного анализа. Это недостаток был обусловлен необходимостью применения численного интегрирования при осуществлении расчетов в среде MATLAB и выражался в том, что длительность вычислений достигала 8 и более часов.

3) Решена задача по разработке методики электрического расчета установившихся режимов работы высоковольтной электропередачи повышенной частоты магистрального типа промышленного электроснабжения с питанием ее от транзисторного преобразователя большой мощности. При разработке этой методики были использованы

результаты усовершенствований, указанные выше. Выполнена программно – алгоритмическая реализация предложенной методики в среде MATLAB.

4) Разработана методика определения параметров (C_0 , L_0 , Z) двухпроводной кабельной линии в виде двух отдельных проводников с твердой изоляцией в общем металлическом экране. Кабель такой конструкции можно рассматривать, как перспективный тип линии для использования в системах электроснабжения повышенной частоты, т.к. они обладают более низкой погонной ёмкостью и реактивной (зарядной) мощностью на повышенных частотах по сравнению с коаксиальными кабелями, кроме этого, такие кабель позволяют создавать управляемые электропередачи повышенной частоты. Знание параметров кабельной линии необходимо для электрического расчета установившихся режимов работы системы электроснабжения повышенной частоты, а также квалифицированного создания и применения таких систем.

Глава 3. Теоретические исследования характеристик систем электроснабжения повышенной частоты

Предложенные в настоящей работе теоретические разработки (гл. 2) позволяют выполнить теоретические исследования различных характеристик высоковольтных ЭТКПЧ, предназначенных для создания систем промышленного электроснабжения, а также их отдельных элементов. Это позволит разработать рекомендации по рациональному устройству и режимам работы таких установок.

3.1. Параметры кабельных линий повышенной частоты различной конструкции

Поскольку волновые и погонные параметры коаксиальных высоковольтных кабелей, которые обычно применяются в составе ЭТКПЧ, хорошо известны [60,62,63,68], интерес представляют сведения о таких показателях для перспективных конструкций высоковольтных кабелей. К числу таких конструкций можно отнести двухпроводные кабели в общем экране (разд. 2.3), а также коаксиальные и двухпроводные кабели с воздушной изоляцией [34,90÷94].

Представленная в разд. 2.3 методика расчетного определения параметров двухпроводных кабельных линий в виде двух изолированных проводников в одном общем экране (рис. 2.6,в) позволяет исследовать влияние различных факторов на эти параметры. На рис. 3.1 приведены расчетные зависимости для погонной емкости такой линии, полученные с помощью формулы (2.64), которые демонстрируют существенное влияние радиуса экрана и радиуса изоляции на величину этого важного параметра.

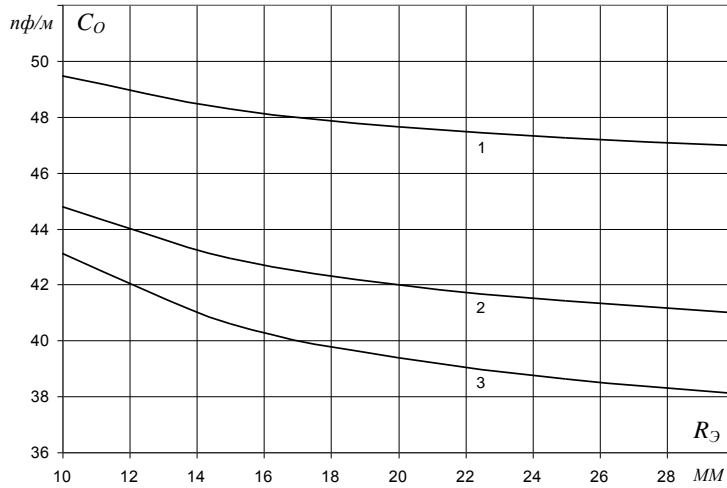


Рис. 3.1 Зависимость погонной емкости двухпроводной кабельной линии (рис. 2.6,б) от радиуса экрана и радиуса изоляции $R_{из}$: 1 – $R_{из} = 2$ мм; 2 – $R_{из} = 3$ мм; 3 – $R_{из} = 4$ мм; $r_0 = 0,75$ мм

Полученные значения погонной емкости (рис. 3.1) позволяют оценить величину волнового сопротивления с помощью формулы (2.61) при известной величине погонной индуктивности. Как будет показано далее, формула (2.60) оказалось непригодной для выполнения таких расчетов, и погонную индуктивность можно определить, как среднее значение по результатам измерений, представленных в табл. 4.1. Результаты расчетов приведены на рис. 3.2 и свидетельствуют о возможности управления величиной волнового сопротивления таких кабельных линий в целях оптимизации конструкции и режимов работы высоковольтных электротехнических комплексов повышенной частоты, в составе которых эти кабельные линии используются.

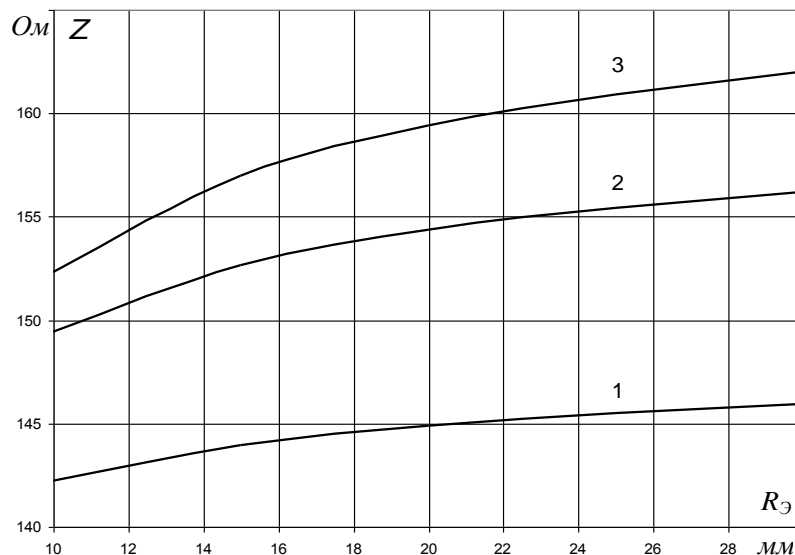


Рис. 3.2. Зависимость волнового сопротивления двухпроводной кабельной линии (рис. 2.6,б) радиуса экрана и радиуса изоляции: 1 – $R_{из} = 2$ мм; 2 – $R_{из} = 3$ мм; 3 – $R_{из} = 4$ мм; $r_0 = 0,75$ мм

Следует заметить также, что волновое сопротивление таких линий (рис. 3.2) значительно превышает величину этого параметра коаксиальных кабелей с твердой изоляцией (75, 50 Ом).

Весьма интересной является оценка влияния угла сдвига по фазе ψ между напряжениями на фазах двухпроводной линии на ее параметры. На рис. 3.3 представлены расчетные зависимости для погонной емкости, полученные с помощью соотношения (2.64), отражающие такое влияние.

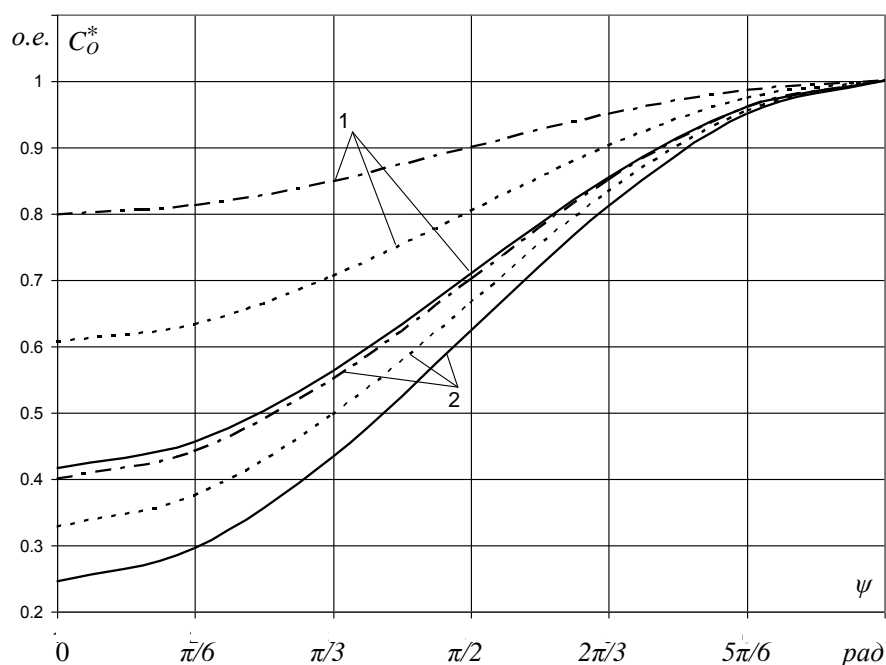


Рис. 3.3. Зависимости относительного значения погонной емкости двухпроводной кабельной линии (рис. 2.8) от угла сдвига по фазе между напряжениями разных фаз (проводах) при различных значениях радиуса экрана и радиуса изоляции: 1 – $R_{\text{э}} = 10$ мм; 2 – $R_{\text{э}} = 30$ мм; сплошные линии – $R_{\text{из}} = 2$ мм; пунктирные линии – $R_{\text{из}} = 3$ мм; штрихпунктирные линии – $R_{\text{из}} = 4$ мм; $r_0 = 0,75$ мм

Эти зависимости (рис. 3.3) демонстрируют достаточно сложное и сильное влияние указанных факторов: при определенных условиях наблюдается более, чем 4-х кратное изменение емкости при изменении ψ в пределах $0 \div \pi$.

При использовании ЭТКПЧ желательно по возможности снижать величину погонной емкости кабель в целях уменьшения реактивной (зарядной) мощности кабельной линии в установившихся режимах работы. Это позволит снизить нежелательные последствия в виде дополнительных

потерь энергии, вызванных перетоками реактивной мощности и ограничения предельной длины кабельной линии.

Достичь уменьшения погонной емкости кабелей различной конструкции можно применением кабелей с воздушной изоляцией, т.е. диэлектрика с минимальным значением относительной диэлектрической проницаемости.

Поэтому была выполнена оценка параметров таких кабеля как коаксиальной, так и двухпроводной конструкции.

Для кабеля коаксиальной конструкции (рис. 3.4) погонная емкость C_0 и индуктивность L_0 определяются с использованием известных соотношении [34,68,94,95]:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R_2}{r_0}} \quad (3.1)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{R_2}{r_0} + \frac{1}{4} \right) \quad (3.2)$$

где R_2 и r_0 определяются согласно рис. 3.4.

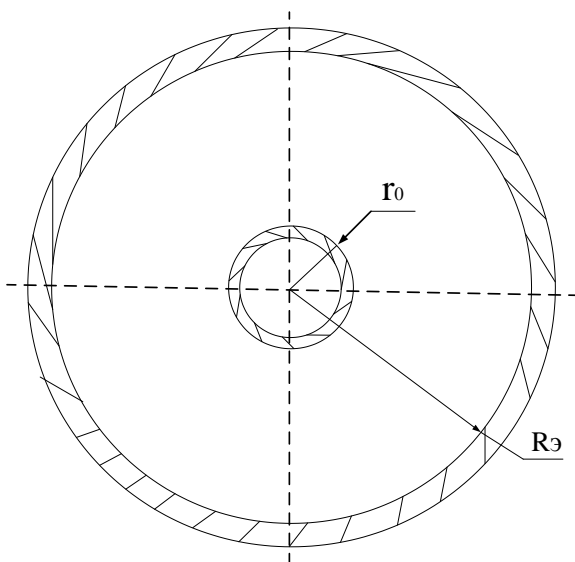


Рис. 3.4. Коаксиальный кабель с воздушной изоляцией

Формулы (3.1) и (3.2) позволяют получить выражение для определения волнового сопротивления:

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon} \left[\left(\ln \frac{R_3}{r_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \ln \frac{R_3}{r_0} \right]}, \quad (3.3)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ - диэлектрическая проницаемость среды: ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала (для воздуха $\varepsilon_r = 1$). Как следует из формулы (3.3), волновое сопротивление коаксиального кабеля зависит только от двух параметров - отношения R_3/r_0 и относительной диэлектрической проницаемости, изоляционного материала, на рис. 3.5 представлены зависимости волнового сопротивления погонной емкости и погонной индуктивности, полученные с использованием соотношений (3.1) (3.2) (3.3).

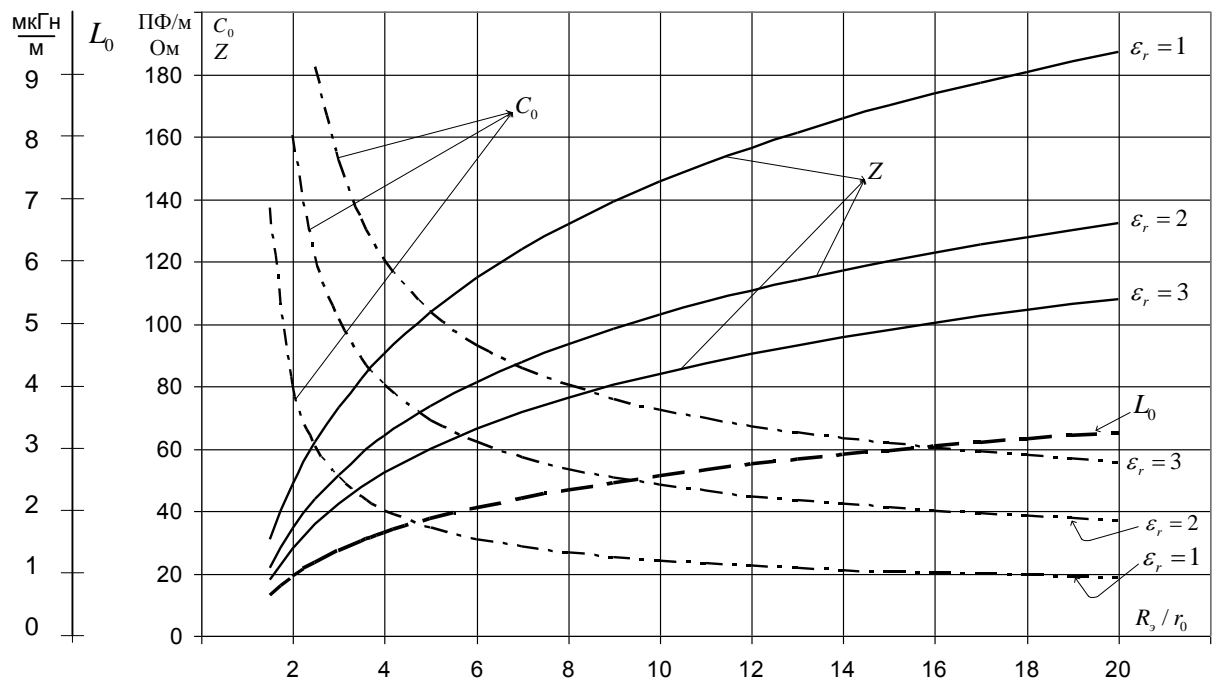


Рис. 3.5. Зависимости погонных параметров и волнового сопротивления высоковольтного коаксиального кабеля с воздушной (газовой) изоляцией от отношения радиуса экрана к радиусу токоведущей жилы

Из рис. 3.5 можно сделать вывод о значительном влиянии отношения R_3/r_0 на параметры коаксиальной кабеля. Действительно, при изменении этого отношения в пределах от 1,1 до 20 погонная емкость снижается более, чем в 30 раз, погонная индуктивность возрастает почти на порядок, а волновое сопротивление увеличивается приблизительно в 19 раз, достигая значения почти 190 Ом в случае применения воздушной изоляции.

Параметры коаксиального кабеля целесообразно сравнить с параметрами двухпроводного кабеля с воздушной изоляцией (рис. 3.6).

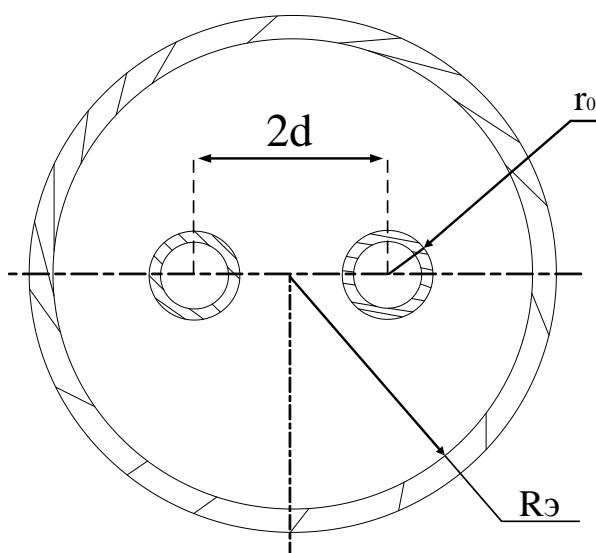


Рис. 3.6 Двухпроводный экранированный кабель с воздушной изоляцией

Используя соотношения (2.59) и (2.64), приведенные в разд. 2.3, можно оценить параметры такого кабеля, полагая $\psi = \pi$, $\varepsilon_r = 1$, а $L_0 = 1,12$ мкГн/м – как среднее значение по результатам измерения согласно табл. 4.1.

Для такой оценки формулу (2.59) целесообразно привести к следующему виду:

$$C_0 = \frac{\pi\varepsilon}{\ln \left[\frac{\left(\frac{R_3^2}{d^2} - 1 \right) \cdot \frac{2d}{r_0}}{\left(\frac{R_3^2}{d^2} + 1 \right)} \right]} \quad (3.4)$$

Тогда, после подстановки в (2.61) значения L_0 и выражения (3.4) получена формула для определения волнового сопротивления двухпроводной кабельной линии:

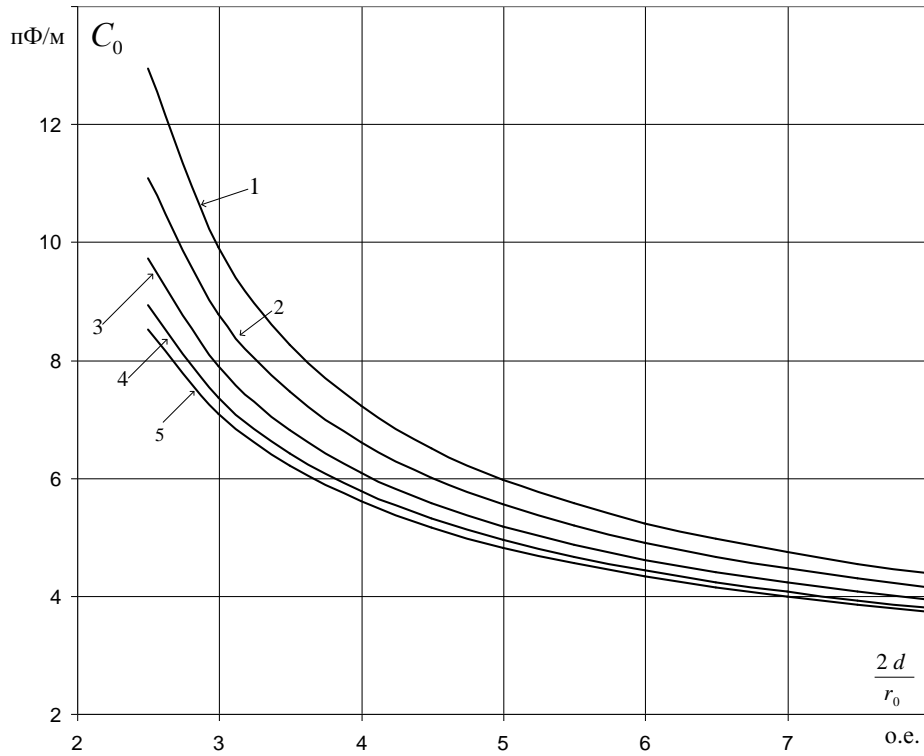
$$Z = \sqrt{\frac{1.12 \cdot 10^{-6} \ln \left[\frac{\left(\frac{R_3^2}{d^2} - 1 \right) \cdot \frac{2d}{r_0}}{\left(\frac{R_3^2}{d^2} + 1 \right)} \right]}{\pi \varepsilon}}. \quad (3.5)$$

Как показывает анализ соотношений (3.4) и (3.5) погонная емкость и волновое сопротивление такого кабеля является функцией уже двух безразмерных параметров R_3/d и d/r_0 . Поэтому зависимости для C_0 и Z удобно представить в виде зависимостей, которые показаны на рис. 3.7.

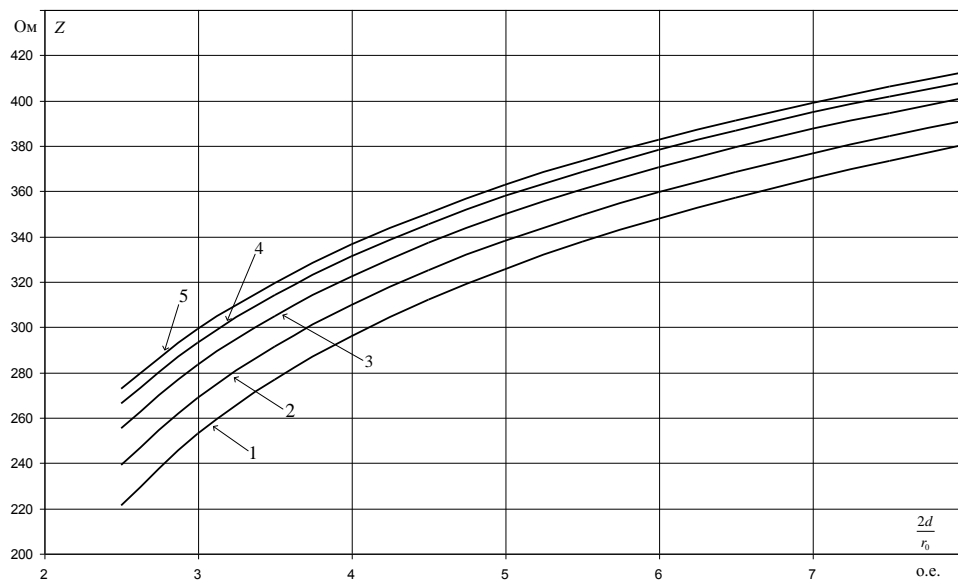
Результаты рис. 3.7. как и в предыдущем случае (рис. 3.5), демонстрируют широкие возможности в управлении параметрами двухпроводных кабельных линий с достижением более низкой погонной емкости и более высокого волнового сопротивления, чем во всех предыдущих случаях. Это позволит снизить (зарядную) реактивную мощность в кабельной линии и вызываемые ею неблагоприятные последствия [34].

Таким образом, есть основание полагать, что применение кабелей с воздушной изоляцией позволит получить наиболее рациональные конструкции и режимы работы ЭТКПЧ.

Соотношения и зависимости представленные в этом разделе являются основой для выбора и конструирования новых типов кабельных линий ЭТКПЧ в целях повышения технико-экономических показателей таких устройств. Причем такое конструирование включает в себя также выбор надежной изоляции [34,70,96,97].



a)



б)

Рис. 3.7. Зависимость погонной ёмкости (а) и волнового сопротивления (б) двухпроводной кабельной линии с воздушной изоляцией от геометрических параметров: 1 – $R_{\text{э}}/d = 2,5$; 2 – $R_{\text{э}}/d = 3$; 3 – $R_{\text{э}}/d = 4$; 4 – $R_{\text{э}}/d = 6$; 5 – $R_{\text{э}}/d = 12$

Вполне очевидно, что задачей дальнейших исследований является разработка высоковольтных кабелей ЭТКПЧ оптимальной конструкции.

3.2. Результаты усовершенствования (модернизации) методики электрического расчета установившихся режимов работы устройств электроснабжения повышенной частоты

При использовании методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ, основанной на применении принципов частотного анализа, обязательно учитывается влияние частоты гармоника разложения кривой ЭДС источника в ряд Фурье на величину внутреннего сопротивления источника питания в виде транзисторного преобразователя напряжения, как показано в разд. 2.1, вместо формулы (2.1) необходимо использовать выражение (2.10). Целесообразно сравнить результаты, которые дают обе формулы, чтобы оценить влияние такой замены. Это удобно сделать, выразив величину внутреннего сопротивления в относительных значениях:

$$Z_{enk}^* = \frac{Z_{ek}}{Z_{en0}} = \sqrt{1 + \left(\frac{kf_1}{f_a} m \right)^2}, \quad (3.6)$$

где $m=1$ для прежнего соотношения (2.1) и $m=1,73$ нового способа определения величины внутреннего сопротивления (2.10). На рис.3.8. представлены зависимости, полученные с использованием соотношения (3.6).

Из зависимостей рис. 3.8 нетрудно сделать вывод, что при использовании нового способа определения внутреннего сопротивления (2.10) значение этого параметра оказывается приблизительно на 70% выше, чем при употреблении ранее предложенной формулы (2.1).

Хотя рис. 3.8 свидетельствует о весьма существенной влиянии предложенной модернизации методики расчетного определения внутреннего сопротивления транзисторного преобразователя, необходимо оценить также ее влияние на результаты расчета характеристик установившихся режимов работы ЭТКПЧ.

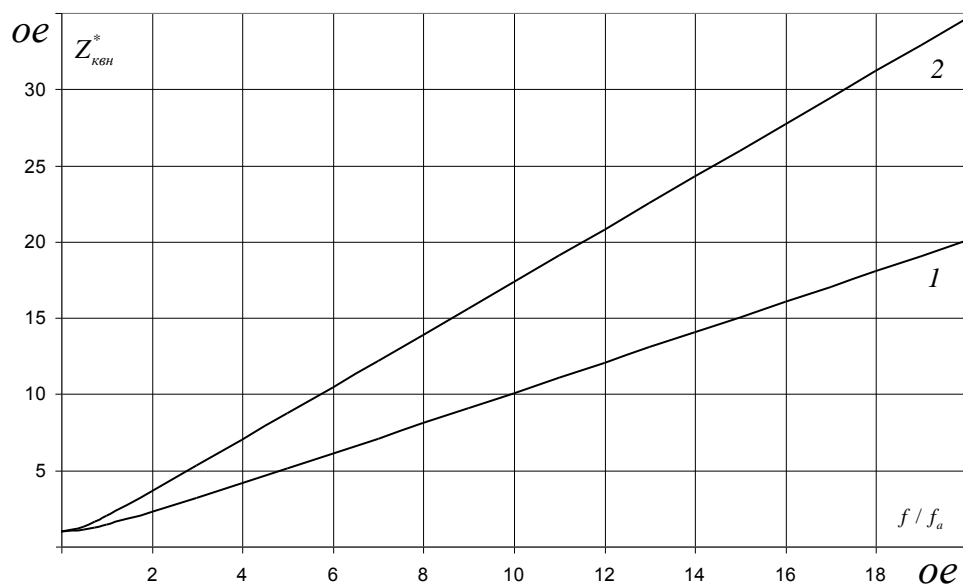
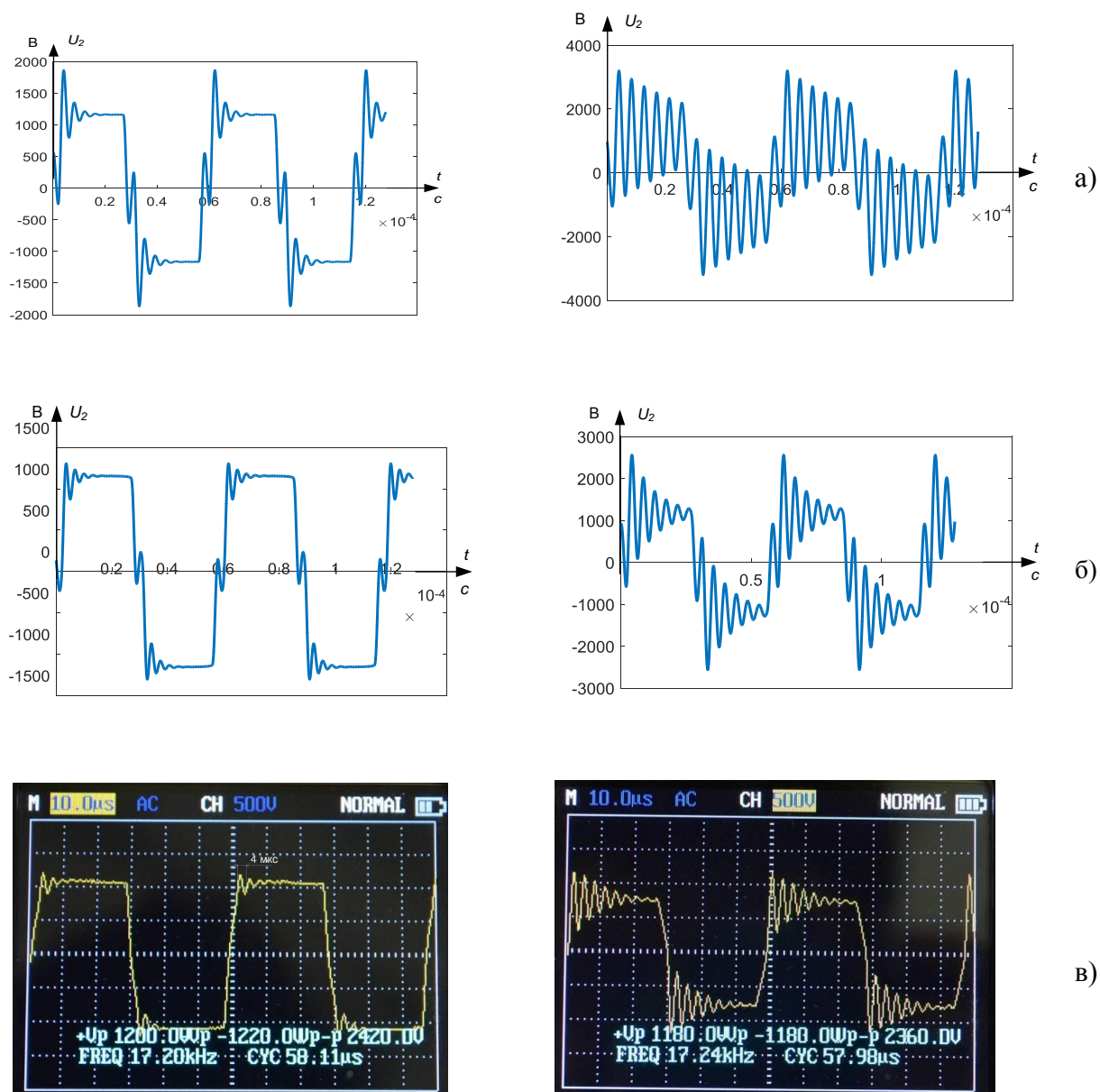


Рис. 3.8. Зависимости величины внутреннего сопротивления транзисторного преобразователя от отношения $f/f_a = kf_1/f_a$:

1 – $m=1$; 2 – $m=1,73$

На рис.3.9 представлены расчетные и опытные осциллограммы напряжения высоковольтной кабельной линии в режиме ХХ и под нагрузкой для макета ЭТКПЧ, описанного в [26,98]. Эти осциллограммы наглядно демонстрируют тот факт, что при использовании нового способа определения $Z_{внк}$ обеспечивается лучшее согласование результатов расчета и опыта. Применение в расчетах ранее предложенной формулы приводит к явно завышенным значениям амплитуды высокочастотных колебаний, т.е. величины внутренних перенапряжений. Это приводит, в свою очередь, к излишним запасам электрической прочности изоляции элементов ЭТКПЧ (высоковольтных силовых трансформаторов и кабельной линии).

Как известно, важнейшим показателем установившегося режима работы ЭТКПЧ является величина активной мощности, передаваемой в нагрузку. Поэтому было выполнено сравнение расчетных и опытных значений этого показателя применительно к макету ЭТКПЧ, описанного в [26,98]. Результаты такого сравнения приведены на рис. 3.10 и свидетельствуют о заметно лучшем согласовании расчетных и опытных значений при использовании в вычислениях вновь предложенной формулы (2.10).



Работа под нагрузкой

Режим холостого хода

Рис. 3.9. Расчетные (а,б) и экспериментальные осциллограммы (в) [26] напряжения на высоковольтной кабельной линии: а – при использовании в расчетах ранее предложенной формулы (2.1); б – при использовании формулы (2.10), предложенной в настоящей работе

Другим важным показателем установившегося режима работы ЭТКПЧ является КПД установки. На рис. 3.11 представлено сравнение расчетных и опытных значений этого параметра применительно к тем же условиям, как и в случае результатов рис. 3.10. Из рис. 3.11 можно сделать вывод о том, что применение формулы (2.10) не столь сильно сказывается на результатах вычисления, как в предыдущих случаях (рис. 3.9 и 3.10), хотя и здесь, нельзя

не отметить, наблюдается лучшее согласование результатов опыта и расчета при использовании формулы (2.10).

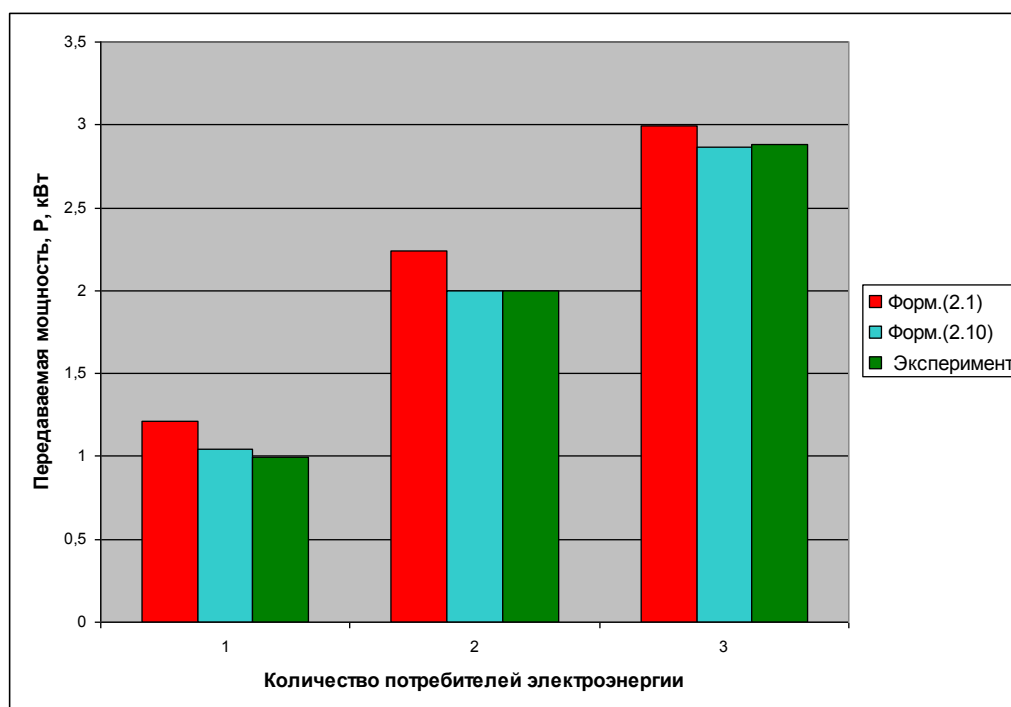


Рис. 3.10. Сравнение расчетных и опытных значений активной мощности [79], передаваемой в нагрузку в зависимости от числа нагрузочных элементов (водонагреватели номинальной мощностью ≈ 1 кВт каждый)

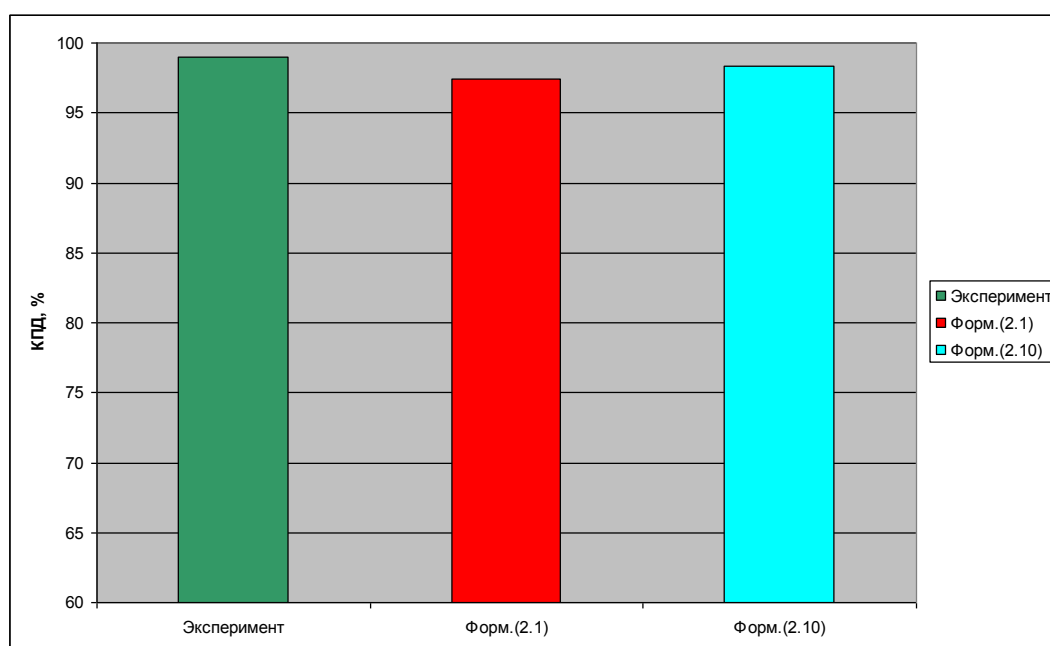


Рис. 3.11. Зависимость КПД ЭТКПЧ от величины передаваемой активной мощности: эксперимент согласно [79]

Полученные результаты (рис. 3.9÷3.11) позволяют сделать однозначный вывод о повышении точности и достоверности вычисления характеристик ЭТКПЧ в установившемся режиме работы благодаря предложенному усовершенствованию в определении внутреннего сопротивления транзисторного преобразователя с помощью формулы (2.10).

Как показано в разд. 3.1, важным элементом модернизации методики электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ, основанной на применении принципов частотного анализа, является получение аналитического выражения для интеграла в формуле (2.14) при определении амплитуды гармоник разложения Фурье для реальной осциллограммы ЭДС (рис. 2.2) транзисторного преобразователя напряжения. Несмотря на то, что полученное аналитическое выражение представляет собой набор достаточно громоздких формул (2.19), их применение в расчетных программах взамен использования численного интегрирования привело к многократному снижению времени вычисления. На рис. 3.12 представлены значения этого времени, полученные в ходе вычислений в среде MatLab при использовании в расчетной программе численного интегрирования и аналитических выражений, полученных в настоящей работе, при различном количестве учитываемых гармоник разложения для ЭТКПЧ, описанных в [79,83].

Как следует из рис. 3.12, с увеличением числа гармоник разложения различие в длительности вычислений разными способами быстро нарастает причем, если при числе гармоник длительность вычислений оказывается почти одинаковой и не превышает 2 мин, то при использовании рекомендуемого значения [27,79,80,87]. длительность вычислений по аналитическим выражениям не превышает 3 мин, а при численном интегрировании достигает 8 часов.

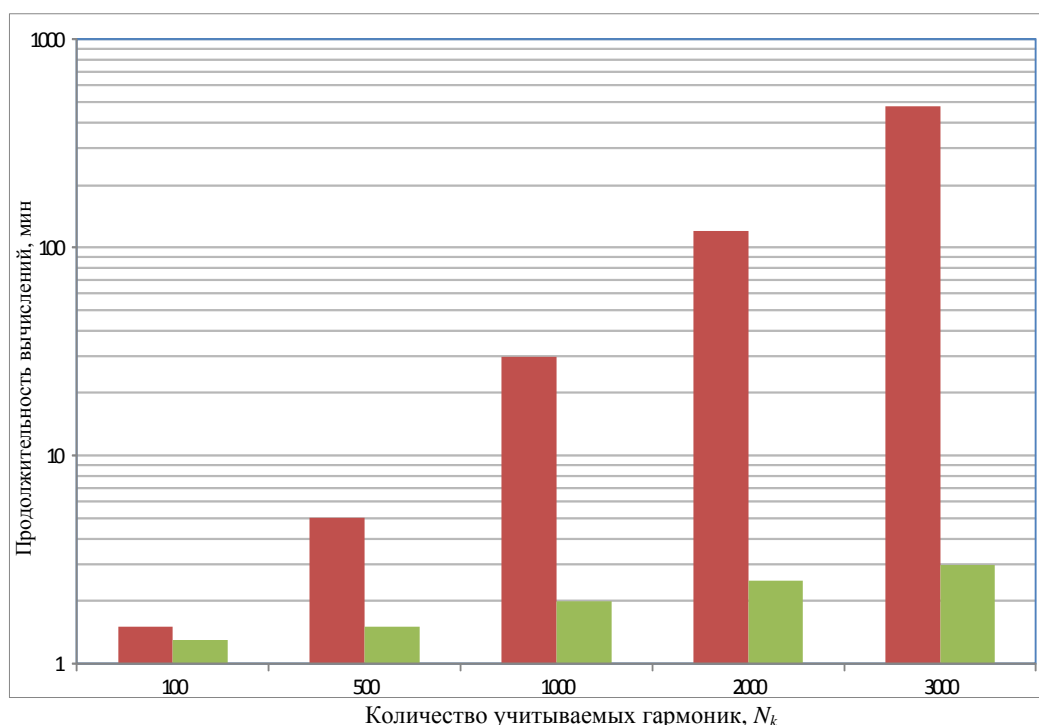


Рис. 3.12 Длительность вычисления характеристик установившегося режима работы ЭТКПЧ в зависимости от количества учитываемых гармоник: Зеленый цвет – использование аналитических выражений; Красный цвет – использование численного интегрирования: процессор: intel® i3-4005U CPU@ 1.70 GHz 1.70 GHz установленная память 8ГБ Системы 64 разрядная windows 8.1 диск 1ТБ acer

Таким образом, модернизация расчетной методики, предложенная в настоящей работе, посредством замены численного интегрирования при разложении кривой ЭДС в ряд Фурье на применение аналитических выражений, полученных в настоящей работе, обеспечивает многократное снижение затрат времени на выполнение расчетов и повышение производительности научно-технических разработок.

3.3. Исследование спектральных характеристик токов, напряжений и мощности в системе электроснабжения повышенной частоты

Как показано в гл.1 и гл.2, основой электрического расчета установившихся режимов работы ЭТКПЧ является применение метода частотного анализа, когда несинусоидальные токи и напряжения во всех

точках установки, начиная с ЭДС источника питания, представляются как сумма гармоник, кратных основной частоте. Поэтому интерес представляет исследование гармонического состава этих величин, а также мощности таких токов с определением его влияния на показатели работы ЭТКПЧ в установившихся режимах работы.

Такое исследование целесообразно выполнить не только применительно к наиболее реальной форме осциллограммы ЭДС (рис. 3.13,в), для которой в настоящей работе предложена методика аналитического определения амплитуд гармоник разложения Фурье с помощью соотношений (2.14) и (2.19), но в целях сравнения и для более простых вариантов представления кривой ЭДС согласно рис. 3.13 [79,80].

Из литературных источников [27,32] известно аналитическое выражение для расчета амплитуды k – ой гармоники по первому варианту (рис. 3.13,а):

$$U_k = \frac{4U_m}{\pi k} \quad (3.7)$$

Второй вариант (рис. 3.13,б) качественно лучше соответствует реальной осциллограмме (рис. 1.10 и 2.2), а также имеет известное [32] и достаточно простое аналитическое выражения для определения амплитуды k – ой гармоники разложения Фурье:

$$U_k = \frac{4U_m}{\pi\omega_1(2t_1 + t_2)} \frac{\sin[k\omega_1(2t_1 + t_2)]}{k^2}, \quad (3.8)$$

где t_1 и t_2 – временные параметры, отмеченные на рис. 3.13,в.

Вполне очевидно, что последний вариант осциллограммы (рис. 3.13,в) в наилучшей степени соответствует реальной осциллограмме ЭДС (рис.1.10). Однако его применение на практике заметно осложняется необходимостью выполнения расчетов с помощью формул (2.14) и (2.19), что приводит к трудностям и снижению производительности программирования.

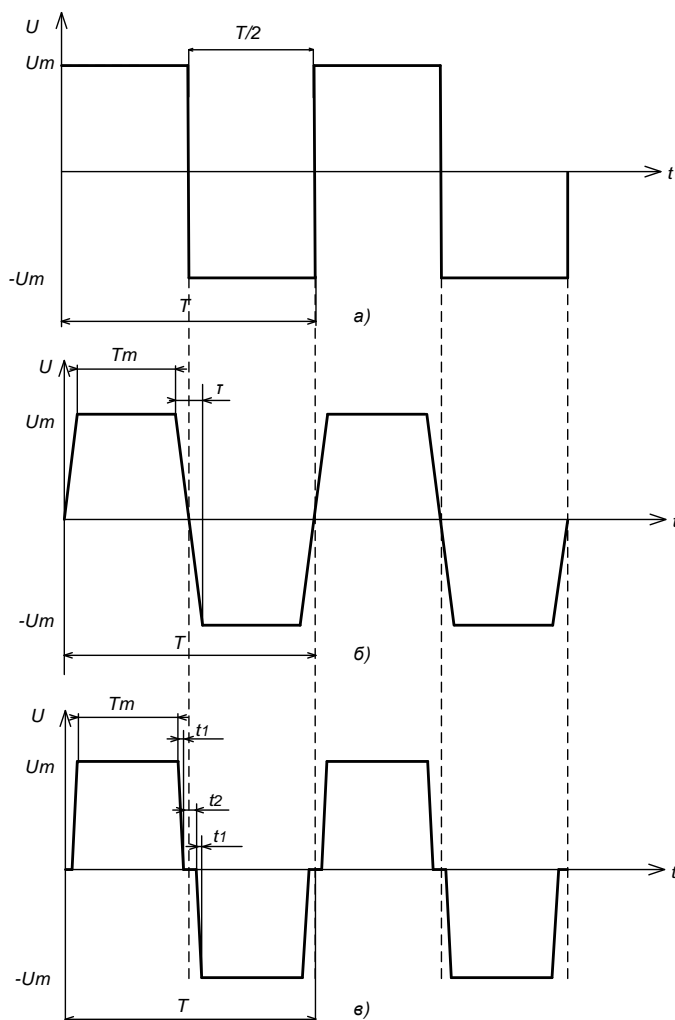


Рис. 3.13 Стилизованная осциллограмма и параметры ЭДС транзисторного преобразователя напряжения $U(t)$: а) – осциллограмма прямоугольной формы; б) – трапецидальной, в) – «трапеция с паузой» (рис. 2.2); длительность амплитудного значения T_m , для сигнала б) – $T_m = (T - 2\tau)/2$, в) – $T_m = (T - 2\tau)/2$ причем, $\tau = 2t_1 + t_2$

Формулы (3.7), (3.8), (2.14) и (2.19) позволяют проанализировать гармонический состав ЭДС полупроводникового преобразователя напряжения для различных вариантов представления реальной осциллограммы (рис. 3.13). Результаты расчета амплитуды гармоник (т.е. спектр сигнала) при частоте переменного напряжения на выходе преобразователя (частоте первой гармоники) $f_1 = 13000$ Гц, амплитуде ЭДС $U_m = 235$ В и $N_k = 3000$ (число учитываемых гармоник при вычислениях [27]) в абсолютных и относительных значениях представлены на рис. 3.14 и рис. 3.15 соответственно.

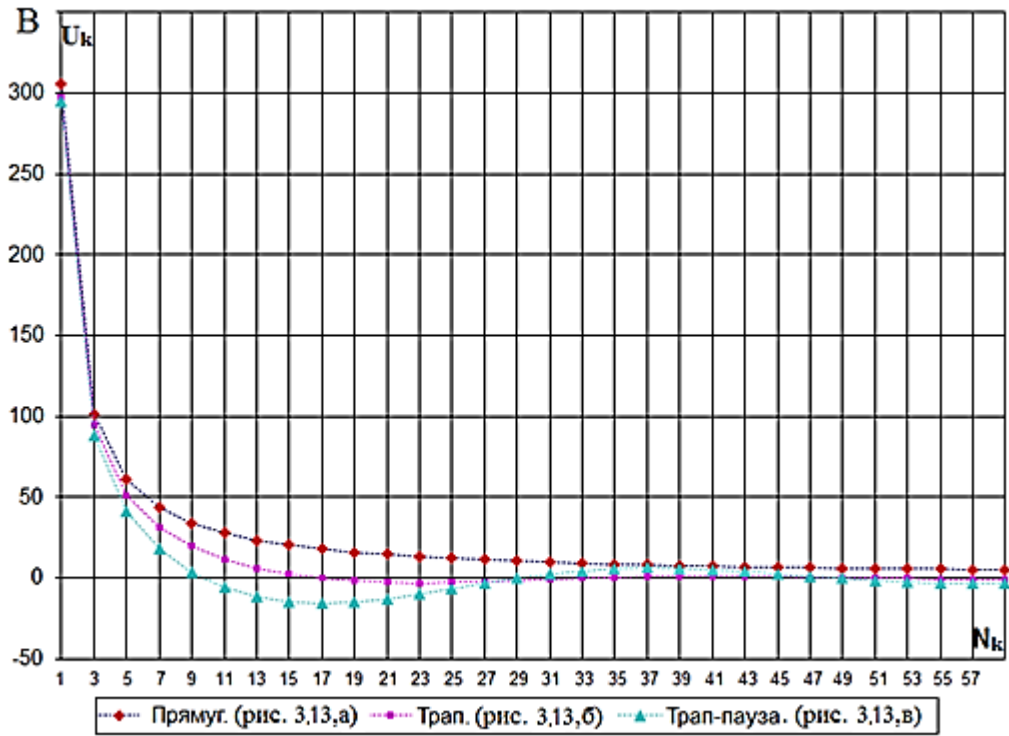


Рис. 3.14. Спектр ЭДС преобразователя (т.е. зависимость амплитуды гармоники U_k от ее кратности) в абсолютных значениях для различных вариантов осциллограммы ЭДС (рис. 3.13)

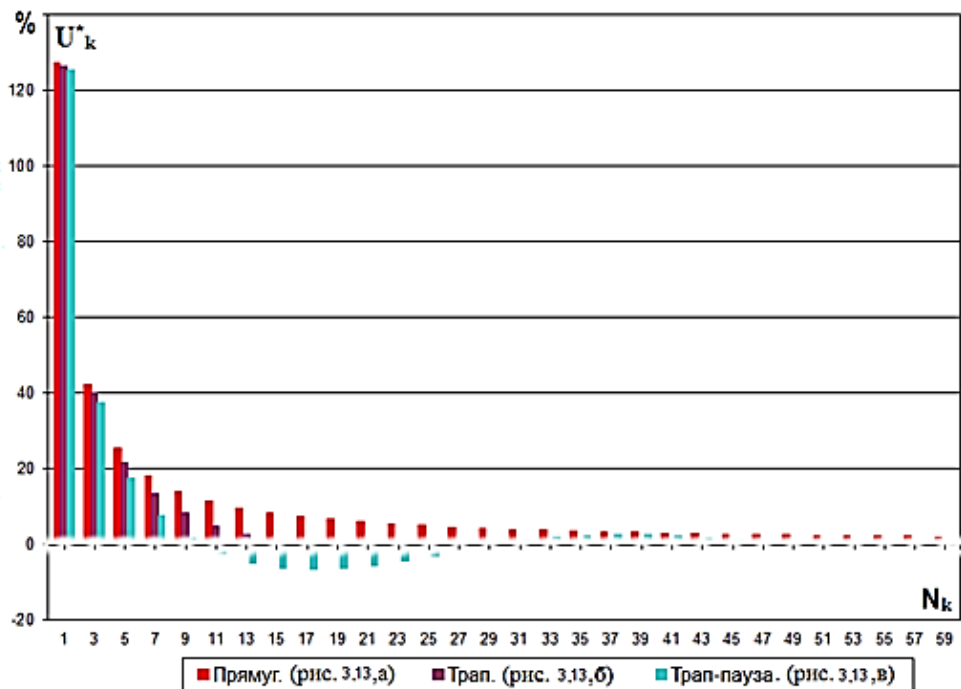


Рис. 3.15. Спектр ЭДС преобразователя рис. 3.13 в относительных значениях:

$$U_k^* = \frac{U_k}{U_m} 100\%$$

Анализ сведений рис. 3.14 и рис. 3.15 позволяет сделать вывод, что почти отсутствует различие между вариантами осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) по амплитуде первой гармоники, величина которой заметно (на $27 \div 29$ %) превышает амплитуду ЭДС. Однако, начиная со следующей (третьей) гармоники и далее различие между вариантами начинает нарастать и лишь после 31-ой гармоники, когда амплитуда гармоник становится меньше 1-2 % от амплитуды ЭДС, происходит сближение спектров. При этом максимально быстрое уменьшение амплитуды гармоники с увеличением ее кратности наблюдается для трапецеидальной осциллограммы ЭДС (рис. 3.13,б), а в случае осциллограммы прямоугольной формы (рис. 3.13,а) амплитуда высших гармоник имеет заметно большую величину во всем рассмотренном диапазоне частот. Одновременно следует отметить, что гармоники, ближайšie к основной, независимо от вида осциллограммы вносят значительный вклад в формирование кривой ЭДС. Например, 3-я гармоника имеет амплитуду около 40 % от амплитудного значения ЭДС, 5-я – 18-25 %, 7-я – 10-19 % (рис. 3.15).

Знание спектрального состава ЭДС (рис. 3.14 и рис. 3.15) позволяет посредством расчета токов и напряжений в различных точках ЭТКПЧ (рис. 2.7) по рассмотренной выше методике (гл.2) определить спектральный состав мощности, передаваемой в нагрузку. Вполне очевидно, что такая характеристика представляет наибольший практический интерес, т.к. активная мощность – важнейший параметр установившегося режима работы любой системы электроснабжения [1,2,4,17,34]. На рис. 3.16 представлены зависимости активной мощности, передаваемой в нагрузку на соответствующей гармонике, от кратности гармоники в относительных значениях:

$$P_{k,H}^* = \frac{P_{k,H}}{P_H} 100\% = \left(\frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_{k,i}^2}{R_{H,i}} \middle/ \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{\infty} U_{k,i}^2}{R_{H,i}} \right) \cdot 100\%, \quad (3.9)$$

где $P_{k,H}$ и P_H – абсолютные значения активной мощности в нагрузке k -й гармоники и полной величины, определяемые с использованием соотношения (2.49).

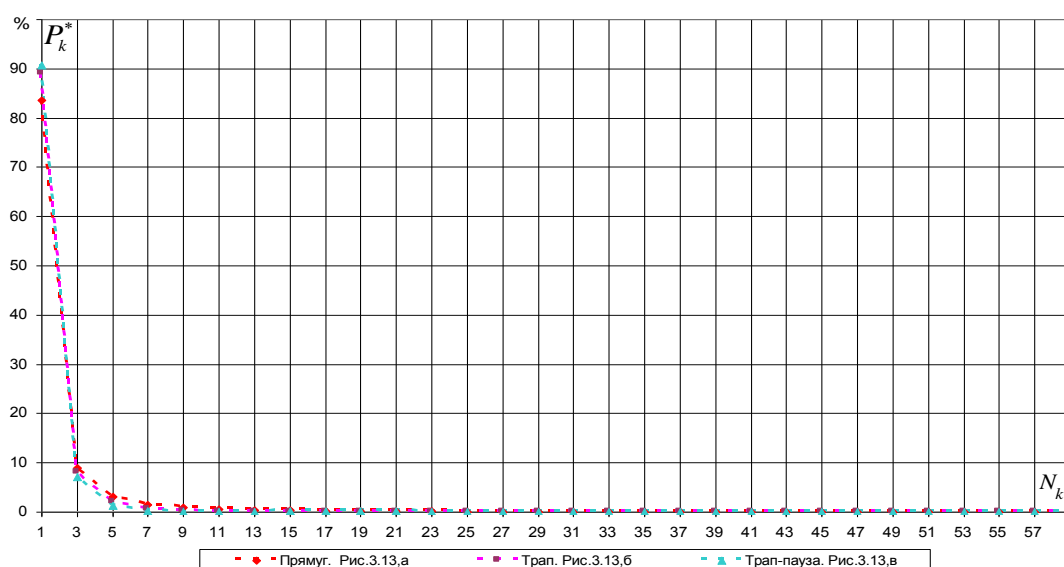


Рис. 3.16. Зависимость относительного значения активной мощности, передаваемой в нагрузку на отдельной гармонике, от кратности этой гармоники при $f_l = 13000$ Гц, $U_m = 235$ В, $I_K = 30$ м, $N_k = 3000$ (рис. 2.7)

Сравнение сведений рис. 3.16 и рис. 3.15 позволяет сделать вывод, что спектральная характеристика мощности (рис. 3.16) отличается заметно большей неравномерностью, чем аналогичная характеристика ЭДС (рис. 3.15). Например, доля мощности, соответствующая первой гармонике, мало зависит от вида осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) и составляет величину $84 \div 90\%$ от полной мощности (наибольшее значение соответствует кривой рис. 3.13,в), наименьшее – рис. 3.13,а), а оставшиеся $10 \div 16\%$ приходятся на все остальные гармоники. Одновременно, заметно меньше по сравнению с

амплитудой гармоник ЭДС (рис. 3.14 и рис. 3.15) различаются значения мощности высших гармоник, соответствующих различным вариантам осциллограммы ЭДС (рис. 3.16). Такой результат объясняется тем, что показатели активной мощности определяются как в абсолютных, так и в относительных значениях пропорционально не амплитудному значению гармоник напряжения, а квадрату этой величины согласно (3.9).

В целях определения минимально необходимого числа учитываемых гармоник для достоверного расчета значений активной мощности в установках повышенной частоты (рис. 2.7) были получены зависимости относительного значения суммарной активной мощности

$$P_{\Sigma, H}^* = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} P_{k, H}}{P_H} 100\% \quad (3.10)$$

от количества учитываемых гармоник N_k , которые представлены на рис. 3.17. Эти зависимости свидетельствуют о заметном влиянии формы осциллограммы ЭДС (рис. 3.13), принятой в расчетах, на спектральный состав суммарной мощности. Причем, если характеристики для вариантов (рис. 3.13,б) и (рис. 3.13,в) достаточно близки, то для случая (рис. 3.13,а) полученная зависимость заметно отличается от первых двух. В целях более точной оценки необходимого числа учитываемых гармоник в ходе расчетов определялось значение погрешности вычисления суммарной мощности по формуле:

$$dP = \frac{\left| (P_H^{N_k} - P_H^{3000}) \right|}{P_H^{3000}} 100\% , \quad (3.11)$$

где P_H^{3000} – расчетное значение активной мощности, полученное при количестве учитываемых гармоник $N_k = 3000$; $P_H^{N_k}$ – расчетное значение активной мощности, полученное при количестве учитываемых гармоник $1 \leq N_k \leq 3000$.

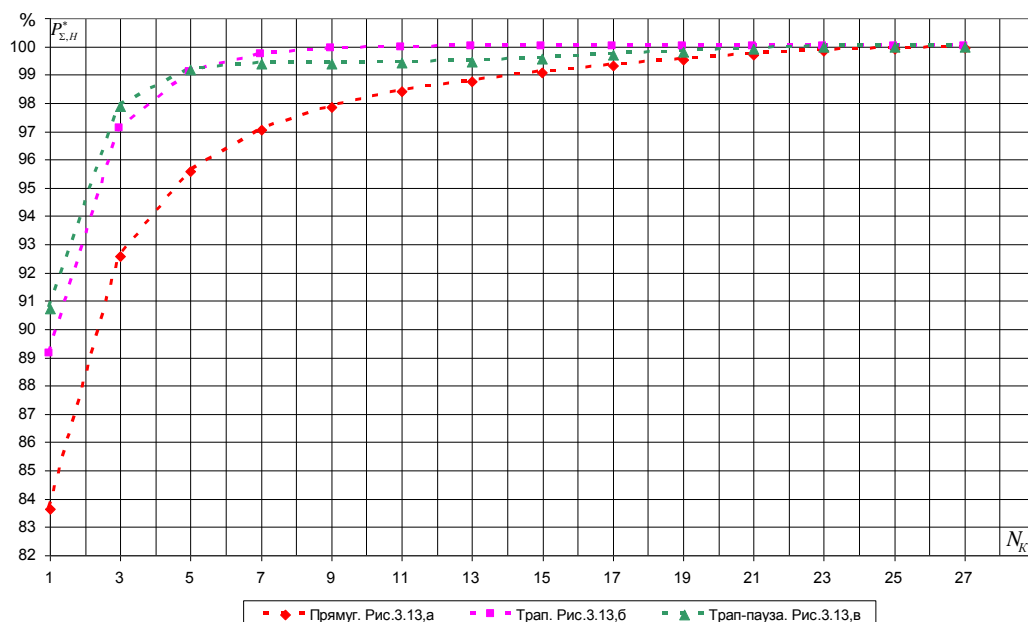
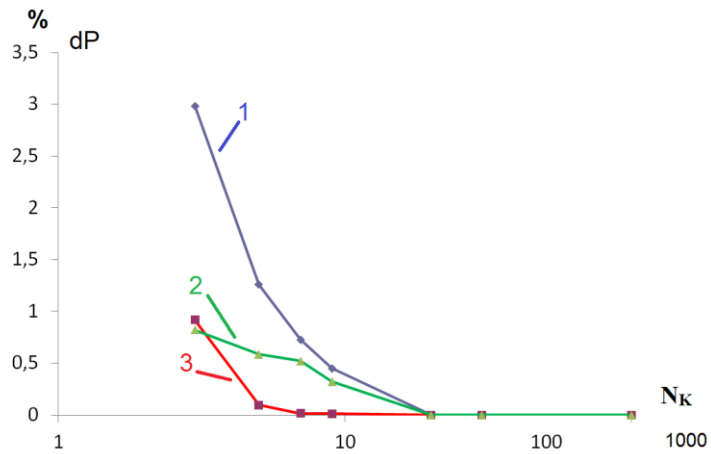


Рис. 3.17. Зависимости относительного значения суммарной активной мощности от количества учитываемых гармоник ($P_H \approx 3$ кВт)

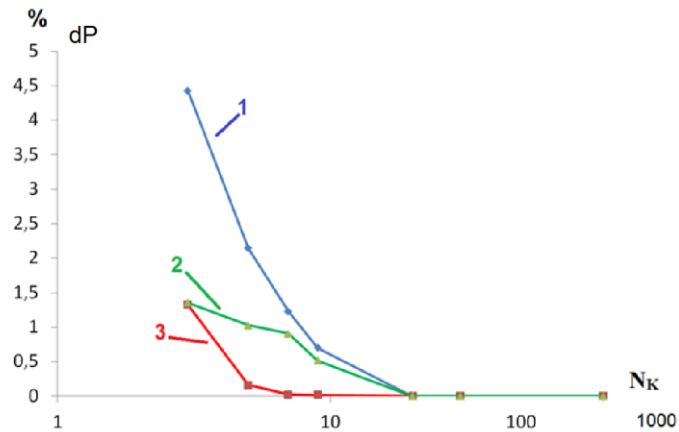
Результаты вычислений с использованием формулы (3.11) приведены на рис. 3.18. Представленные зависимости (рис. 3.18) позволяют сделать вывод, что при учете в вычислениях первых 30 гармоник (с кратностью от 1 до 59) независимо от формы расчетной осциллограммы (рис. 3.13) погрешность dP определения мощности становится практически равной нулю (в расчетах менее 0,0001%). Одновременно, наблюдается заметное влияние выбора формы осциллограммы ЭДС (рис. 3.13), а также абсолютное значение активной мощности P_H на величину ΔP в области малых значений Nk : наименьшая погрешность соответствует осциллограмме рис.3.13,б (трапеция), наибольшая – осциллограмме рис. 3.13,а (прямоугольная), а увеличение передаваемой мощности (P_H) приводит к увеличению погрешности для всех вариантов осциллограммы ЭДС (рис. 3.13).

Анализ сведений, представленных на рис. 3.16 ÷ 3.18, позволяет сделать заключение, что предложенное ранее [16,27,80] значение учитываемых гармоник = 3000, выбранное из соображений устранения эффекта Гиббса в результатах вычислений, с большим запасом обеспечивает достоверное определение активной мощности в нагрузке при любом варианте расчетной

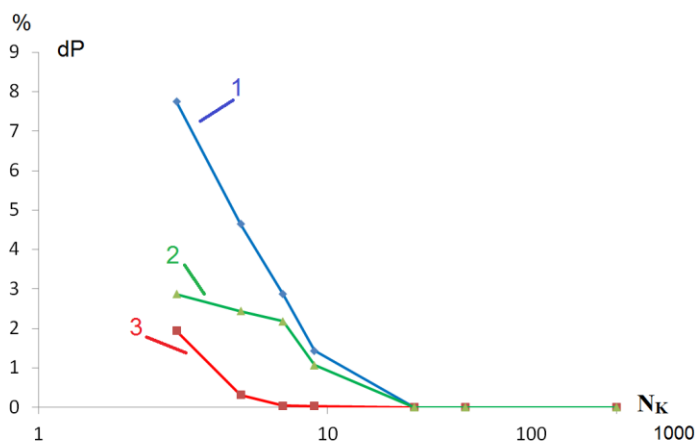
осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) и применительно к рассматриваемому объекту (рис. 2.7).



а)



б)



в)

Рис. 3.18. Зависимости погрешности определения расчетного значения активной мощности P_H от числа учитываемых гармоник: а – $P_H \approx 1$ кВт; б – $P_H \approx 2$ кВт; в – $P_H \approx 3$ кВт

Вместе с тем представленные выше результаты не позволяют сделать однозначный вывод о наиболее приемлемом варианте расчетной осциллограммы ЭДС из числа приведенных на рис. 3.13.

Для решения такой задачи целесообразно сравнить расчетные значения активной мощности в нагрузке P_H по абсолютной величине, полученные при одинаковых условиях для различных вариантов расчетной осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) с результатами эксперимента. Кроме этого, такое сравнение целесообразно выполнить и для другого важного параметра – КПД установки, значение которого несложно определить по формуле (2.56)[28,86,87]:

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Delta P + \Delta P_{II}}, \quad (3.12)$$

где ΔP – мощность потерь энергии в активных сопротивлениях силовых трансформаторов и в кабельной линии (рис. 2.7), создаваемых всеми гармониками; ΔP_{II} – мощность потерь энергии в преобразователе напряжения (рис. рис. 2.7), обусловленная всеми гармониками тока в транзисторах; указанные параметры определяются посредством опыта или эксперимента по методике, рассмотренной в [28,32].

На рис. 3.19 и рис. 3.10 представлены характерные результаты определения мощности P_H и КПД установки, соответственно, расчетным и экспериментальным способами при различной нагрузке [86]. При этом расчетные значения определены для всех трех вариантов расчетной осциллограммы ЭДС (рис. 3.13).

Анализ полученных результатов (рис. 3.19 и рис. 3.20) показывает, что выбор формы осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) практически не влияет на результаты расчета КПД установки (рис. 3.20) при хорошем согласовании расчетных и экспериментальных значений, что лишний раз подтверждает достоверность применяемых расчетных и экспериментальных методик [26÷28,32,86,87].

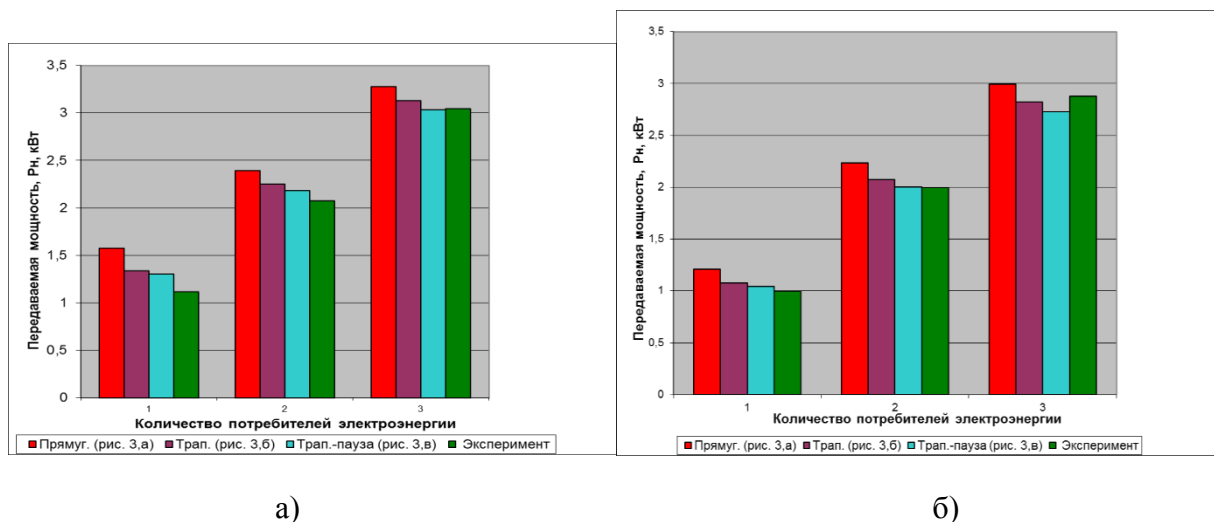


Рис. 3.19. Сравнение расчетных и экспериментальных значений активной мощности в нагрузке: частота рабочего напряжения $f = 13$ кГц; а – кабельная линия РК-75, $l_k = 30$ м; б – кабельная линия РК-50, $l_k = 39$ м

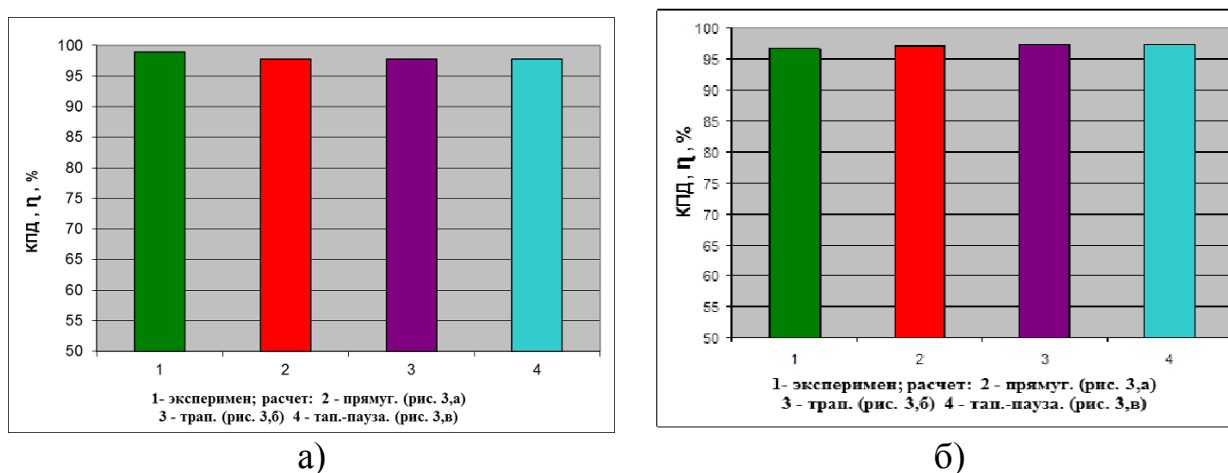


Рис. 3.20. Сравнение расчетных и экспериментальных значений активной мощности в нагрузке: частота рабочего напряжения $f = 13$ кГц; а – кабельная линия РК-75, $l_k = 30$ м; б – кабельная линия РК-50, $l_k = 39$ м

Однако при определении абсолютного значения активной мощности в нагрузке, как свидетельствует рис. 3.19, пренебрегать влиянием варианта представления осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) уже нельзя. Вполне очевидно, что наилучшее согласование результатов расчета и эксперимента в этом случае достигается при использовании в расчетах варианта осциллограммы ЭДС, представленного на рис. 3.13,в (трапеция с паузой). В остальных вариантах получаются недопустимо завышенные результаты расчета (рис. 3.13).

Методика электрического расчета цепей с полупроводниковыми преобразователями напряжения (разд. 2.2, 2.3), а также ее программно-алгоритмическая реализация в среде Matlab позволяют наряду с определением рассмотренных выше параметров выполнять построение и анализ расчетных осциллограмм изменения во времени токов и напряжений в установившемся режиме в любой точке объекта (рис. 2.3 и 2.7). Очевидно, представляет интерес определение влияния формы осциллограммы ЭДС (рис. 3.13) на результаты расчета осциллограмм. На рис. 3.21 представлены характерные расчетные для разных вариантов представления кривой ЭДС (рис. 3.13) и экспериментальные осциллограммы, полученные при одинаковых условиях. Эти результаты свидетельствуют о том, что расчетные осциллограммы незначительно различаются между собой и хорошо согласуются с осциллограммой, полученной в эксперименте как качественно, так и количественно, например, по величине установившегося (т.е. после затухания высокочастотной составляющей) амплитудного значения. Заметные расхождения имеют место лишь по величине высокочастотной составляющей, которая определяет амплитуду перенапряжений на изоляции. При использовании в расчетах осциллограммы рис. 3.13,а («прямоугольная» форма) амплитуда высокочастотной составляющей получается завышенной по отношению к экспериментальному значению. Для осциллограммы рис. 3.13,б («трапеция») этот параметр имеет заниженную величину и лишь для осциллограммы рис. 3.13,в («трапеция» с паузой) достигается практически полное согласование результатов расчета и эксперимента.

Частота колебаний высокочастотной составляющей согласно рис. 3.21 имеет величину порядка $250 \div 300$ кГц. Как показали расчетные оценки с использованием параметров схемы замещения установки (рис. 2.4), рассмотренной в [27], она приблизительно соответствует частоте свободных колебаний последовательного контура, образованного индуктивностью рассеяния трансформатора T_{r1} и емкостью кабельной линии. Это означает, что высокочастотные колебания возникают в момент быстрой смены

полярности переменного напряжения вследствие резонанса приблизительно на 19-23-й гармонике (рис. 3.14, рис. 3.15).

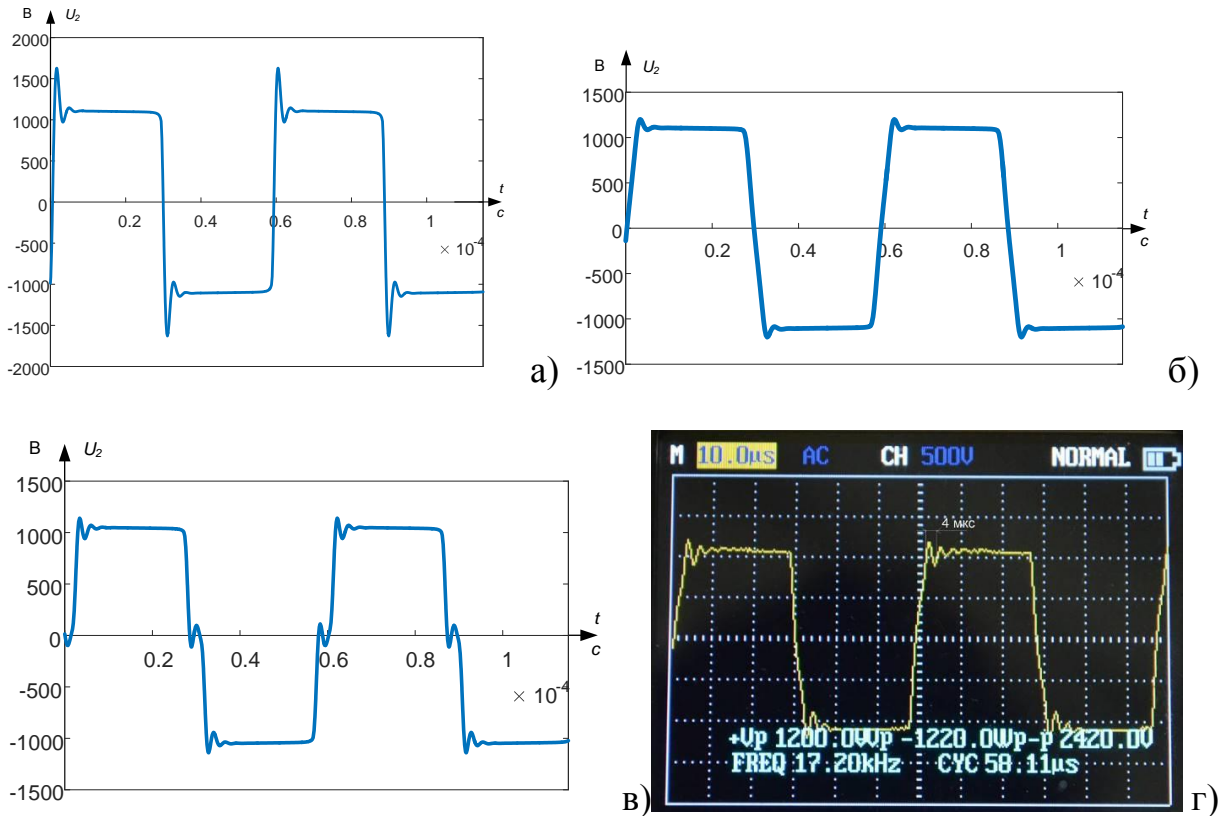


Рис. 3.21. Расчётные (а), (б), (в) и экспериментальная (в) осциллограммы напряжения $f=17$ кГц при работе под нагрузкой (1 кВт) в конце кабельной линии U_2 , протяженностью $l_k=12$ м ($Z=50$ Ом): а – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 13,а («прямоугольная» форма); б – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 13,б («трапецидальная» форма; в – в расчетах осциллограмма ЭДС соответствует рис. 13,в («трапецидальная с паузой» форма); г – экспериментальная осциллограмма напряжения

Результаты, представленные на рис. 3.21 хорошо коррелируются с характеристиками спектрального анализа ЭДС (см. рис. 3.14, рис. 3.15). Действительно, наибольшее значение амплитуды указанных гармоник наблюдается для осциллограммы вида рис. 3.13,а (прямоугольная форма) и этому варианту соответствует наибольшее значение амплитуды высокочастотной составляющей (рис. 3.11,а). Второе место по величине амплитуды этих гармоник и амплитуды высокочастотной составляющей (рис. 3.11,в) занимает вариант осциллограммы ЭДС вида рис. 3.13,в («трапеция» с паузой), и последнее место по этим показателям занимает вариант осциллограммы ЭДС вида рис. 3.13,б («трапеция»). Вполне

очевидно, что требуется дальнейшее изучение резонансных процессов в рассматриваемых устройствах, т.к. они способны приводить к заметным перенапряжениям на высоковольтной изоляции [26,27]. Этот вывод подтверждается повышенным вниманием к таким перенапряжениям и со стороны других исследователей [99-101].

Нельзя не отметить то обстоятельство, что даже в наилучшем варианте осциллограммы ЭДС – рис. 3.13,в («трапеция» с паузой), имеет место неполное соответствие результатов расчета и эксперимента (см. рис. 3.21,в и рис. 3.21,г). Оно проявляется в наличии высокочастотных колебаний вблизи нулевого значения напряжения в момент изменения полярности переменного напряжения на расчетной осциллограмме (рис. 3.21,в), которые отсутствуют в экспериментальной осциллограмме (рис. 3.21,г) [26]. Такое расхождение обусловлено, по-видимому, влиянием нелинейного характера реальной динамической петли гистерезиса материала (феррита) магнитопроводов силовых трансформаторов [102] (рис. 2.3, 2.4), которое в расчетной методике в настоящее время не учитывается. Однако этот фактор практически не оказывает влияния на параметры установившегося рабочего режима установки [102]. С другой стороны, в некоторых особых случаях, например в режиме холостого хода, игнорирование этого фактора может привести к погрешностям в вычислениях. Поэтому требуются дальнейшее развитие и уточнение расчетной методики [27,83] (разд. 2.2).

3.4. Режимы работы и параметры высоковольтной магистральной схемы электроснабжения повышенной частоты

Разработанная и представленная в гл. 2 методика электрического расчета установившихся режимов магистральной схемы электроснабжения повышенной частоты позволяет выполнить исследования различных характеристик таких устройств. Естественно, для такой схемы

электроснабжения существует огромное количество вариантов ее реализации. Поэтому для теоретических исследований целесообразно использовать по возможности простой наглядный удобный для экспериментальной проверки вариант – это магистральная линия с одной отпайкой, электрическая схема которой приведена на рис. 3.22.

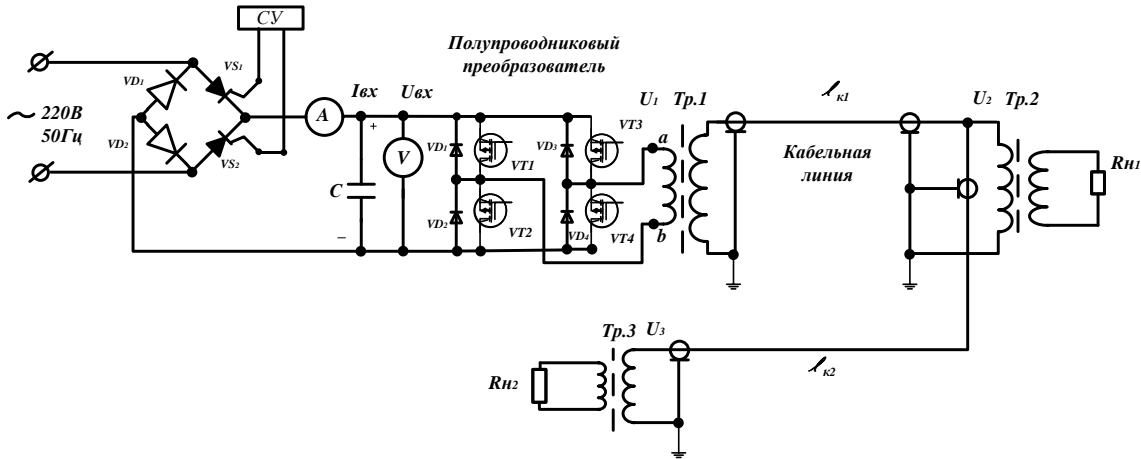


Рис. 3.22. Электрическая схема ЭТКПЧ в виде магистральной линии с одной промежуточной точкой

Наиболее важными, с практической точки зрения, являются характеристики работы высоковольтной кабельной линии по напряжению, так как они определяют качество электроэнергии. На рис. 3.23, 3.24 и 3.25, приведены расчетные зависимости высокого напряжения в трёх точках магистральной кабельной линии при различных значениях нагрузки в её конечной и промежуточной точках от длины участков этой кабельной линии при коэффициенте трансформации $K_{TP1} = K_{TP2} = K_{TP3} = 5$ (рис. 3.22).

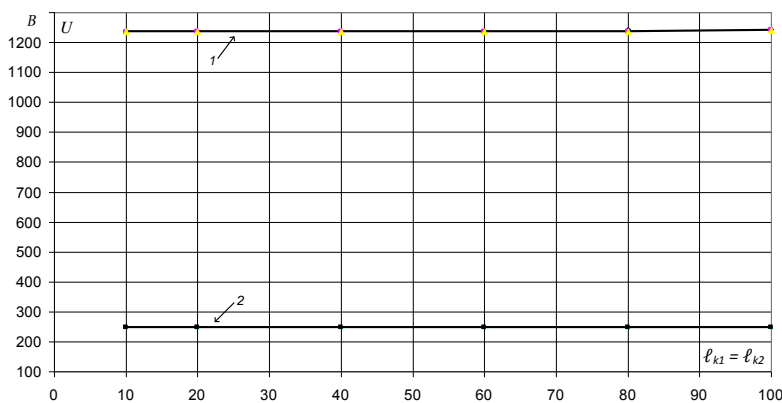


Рис. 3.23 Зависимости напряжения от длины участков l_{k1} и l_{k2} при $P_{H1} = P_{H2} \cong 2$ кВт:

1 – напряжение в начальной, промежуточной и конечной точках высоковольтной кабельной линии; 2 – напряжение на нагрузке в конечной и промежуточной точках

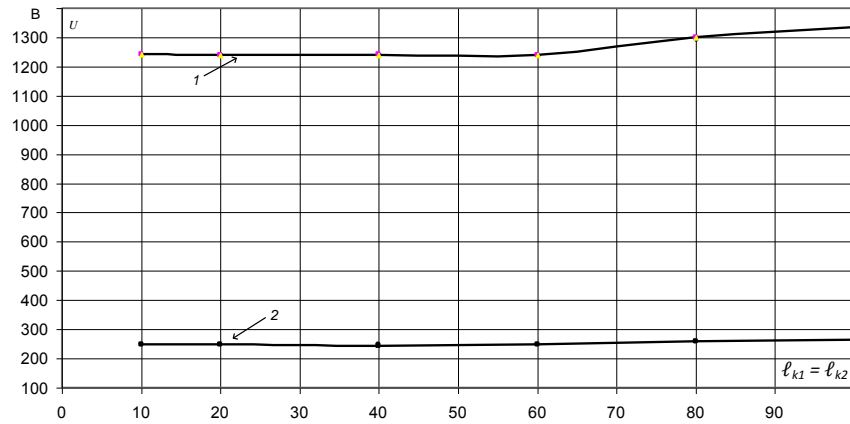


Рис. 3.24. Зависимости напряжения от длины участков l_{k1} и l_{k2} при $P_{H1} \cong 1$ кВт и $P_{H2} \cong 3$ кВт: 1 – напряжение в начальной, промежуточной и конечной точках высоковольтной кабельной линии; 2 – напряжение на нагрузке в конечной и промежуточной точках

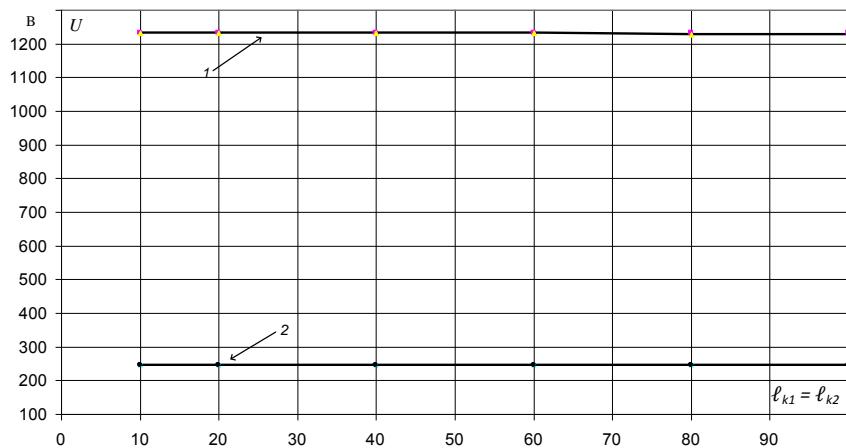


Рис. 3.25 Зависимости напряжения от длины участков l_{k1} и l_{k2} при $P_{H1} \approx 3$ кВт, $P_{H2} \cong 1$ кВт: 1 – напряжение в начальной, промежуточной и конечной точках высоковольтной кабельной линии; 2 – напряжение на нагрузке в конечной и промежуточной точках

Расчеты, представленные на рис. 3.23÷3.25 выполнены в предположении, что для изготовления линии используется кабель типа РК-75.

Получение результаты (рис. 3.23÷3.25) следует оценить как достаточно оптимистичные: при изменении различных факторов l_{k1} и l_{k2} , P_{H1} , P_{H2} весьма широких пределах величина напряжения на линии, а, следовательно, у потребителя колеблется в диапазоне 5%, т.е. в достаточно малых и допустимых пределах с точки зрения существующих требований [34]. Характерно, что напряжение на линии в различных ее точках, а также на нагрузке, включенной в промежуточной и конечной точках, имеет

практически одинаковую величину. Таким образом, не следует опасаться того, что изменение места подключения нагрузки на кабельной линии может привести к недопустимому ухудшению качества электроэнергии.

При оценке режима работы ЭТКПЧ по напряжению интерес представляют исследование влияния на этот показатель значения мощности нагрузки при фиксированных значениях длины участков кабельной линии l_{k1} и l_{k2} (рис. 3.22), особенно при значениях этих параметров, близких предельным, например $l_{k1} = l_{k2} = 80_M$, эти значения предложены на основании анализа производственных условий, предполагаемого применения систем электроснабжения на основе ЭТКПЧ.

На рис. 3.26 представлены зависимости высокого напряжения на кабельной линии от величины мощности нагрузки, $P_H = P_{H1} + P_{H2}$, которые также демонстрируют высокую стабильность рабочего напряжения на линии при глубоком изменении потребляемой мощности.

В целом, можно сделать вывод, что при эксплуатации систем электроснабжения выполненных на основе ЭТКПЧ, не ожидается возникновения достаточно распространенной проблемы недопустимого колебания напряжения у потребителя.

Одним из важнейших эксплуатационных показателей систем электроснабжения является её КПД.

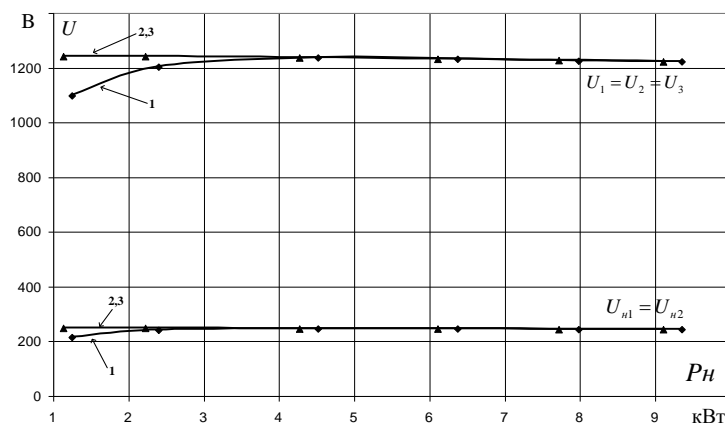


Рис. 3.26. Зависимость величины высокого напряжения в различных точках высоковольтной кабельной линии от величины мощности нагрузки при

$l_{k1} = l_{k2} = 80_M$: 1 – линия в виде кабеля РК-75; 2,3 – линия в виде двухпроводного кабеля в экране с твердой изоляцией проводников и с воздушной изоляцией

Поэтому на рис. 3.27 представлены расчетные зависимости этого параметра от величины мощности $P_H = P_{H1} + P_{H2}$ для тех же условий, что и зависимости рис. 3.26. В этом случае, очевидно, эти кривые (рис. 3.26) представляют собой нижнюю границу из всех возможных значений этого параметра. Приведенный результат (рис. 3.27) хорошо согласуется с результатами, полученными для радиальной линии [16] и, одновременно показывает, что применение коаксиального кабеля приводит к несколько худшим результатам (меньше величина напряжения, ниже КПД) при величине передаваемой мощности 1÷5 кВт, что можно объяснить более высоким значением реактивной мощности.

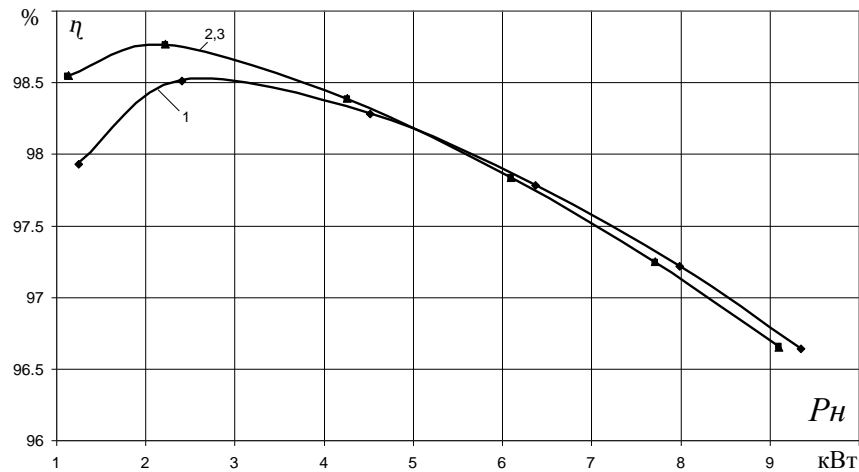


Рис. 3.27. Зависимость КПД системы электроснабжения повышенной частоты от мощности нагрузки, при $\ell_{k1} = \ell_{k2} = 80\text{ м}$: 1 – линия в виде кабеля РК-75; 2,3 – линия в виде двухпроводного кабеля в экране с твердой изоляцией проводников и с воздушной изоляцией (номинальная мощность установки – 4,5 кВт)

При конструировании и эксплуатации систем электроснабжения необходимо обеспечивать величину максимального тока I_{max} в кабельной линии в пределах допустимого значения $I_{доп}$ в целях обеспечения нормального температурного режима:

$$I_{max} \leq I_{доп} = j_{доп} \cdot F, \quad (3.13)$$

где: $j_{доп} = 2,5 \text{ А/мм}^2$ – предельно допустимое значение плотности тока в кабельной линии [34], F – площадь поперечного сечения токоведущей жилы кабеля.

Как известно, кабельные линии обладают высокой зарядной реактивной мощностью, и максимальное значение тока I_{max} в ней имеет место в начале линии, где активная мощность суммируется с наибольшим значением реактивной мощности и где должно быть обеспечено выполнение условия (3.13).

При фиксированном значении передаваемой активной мощности это достигается ограничением длины кабельной линии предельным значением l_{np} [34].

Предварительные оценки с использованием методики электрического расчета (разд. 2.2) показали, что в случае магистральной линии (рис. 3.22) наибольшее значение I_{max} возникает когда нагрузка в промежуточной точке равна $P_{H1} = 0$. Это ситуация должна рассматриваться в качестве расчетного случая при определении предельной длины кабельной линии повышенной частоты [103].

$$l_k = l_{k1} + l_{k1} \leq l_{np}. \quad (3.14)$$

На рис. 3.28 представлены расчетные зависимости величины тока в начале и в конце линии от ее длины при различных значениях передаваемой мощности, а также отмечено значение I_{don} и указан порядок определения l_{np} расчетной выполнены для случая применения кабеля типа РК-75 при номинальном напряжении линии 1,25 кВ (напряжение лабораторного макета) и 2 кВ (предельное напряжение кабеля).

Эти зависимости наглядно иллюстрируют, что по мере увеличения передаваемой активной мощности предельная длина кабельной линии l_{np} уменьшается, и закон изменения этого параметра демонстрирует рис. 3.29, полученный на основании зависимостей вида рис. 3.28.

Как следует из этих зависимостей (рис. 3.29), при определенном значении передаваемой мощности l_{np} достигает нулевого значения, т.е. длительная передача активной мощности становится невозможной.

Аналогичным образом действует и повышение номинального напряжения кабельной линии.

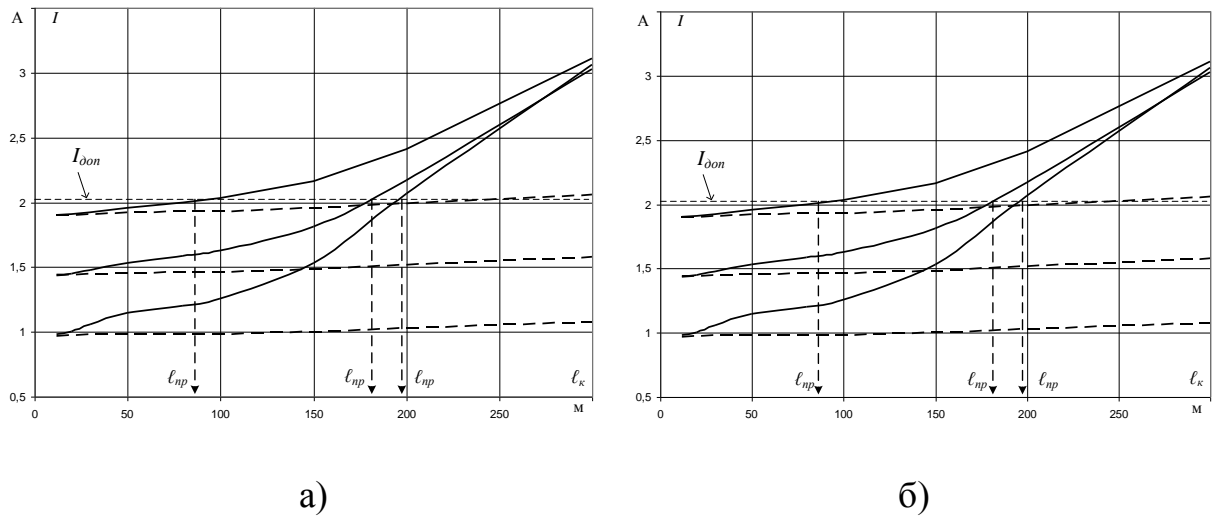


Рис. 3.28. Зависимость величины тока в конце (пунктирные линии) и в начале (сплошные линии) от длины кабеля: а) – $U_{ном} = 1,25$ кВ; б) – $U_{ном} = 2$ кВ; $f \cong 13$ кГц

На этом же рис. 3.29 приведены аналогичные кривые для других конструкции кабельной линии, полученные посредством построения зависимостей вида рис. 3.28.

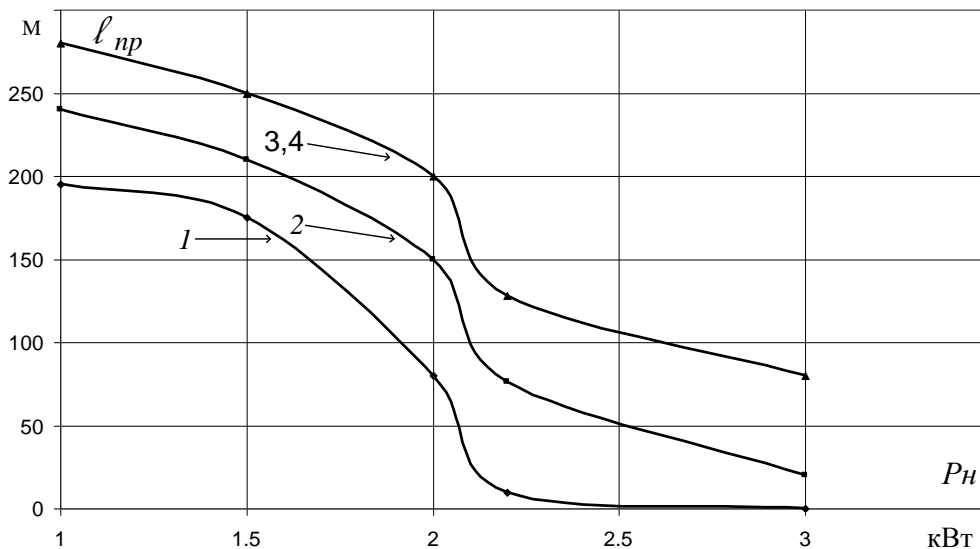


Рис. 3.29. Зависимости предельной длины кабельных линий различной конструкции от величины передаваемой активной мощности при одинаковой величине $I_{доп}$: 1 – коаксиальный кабель типа РК-75; 2 – двухпроводный кабель в общем электромагнитном экране с твердой изоляцией токоведущих жил (рис. 3.26,б); 3 – коаксиальный кабель с воздушной изоляцией; 4 – двухпроводный кабель с воздушной изоляцией

Как следует из этих зависимостей (рис. 3.29), при определенном значении передаваемой мощности ℓ_{np} достигает нулевого значения, т.е. длительная передача активной мощности становится невозможной.

Аналогичным образом действует и повышение номинального напряжения кабельной линии.

Характерно, что применение кабельных линии в составе ЭТКПЧ перспективных конструкций позволяет достичь желаемого на практике увеличения предельной длины кабельных линий.

Зависимости рис. 3.29 являются одной из основ конструирования ЭТКПЧ для промышленных систем электроснабжения повышенной частоты.

3.5. Особенности работы схемы электроснабжения при наличии реактивной нагрузки

До настоящего времени установившихся режимы работы высоковольтных ЭТКПЧ изучались применительно к случаю, когда электроприёмники представляют собой чисто активную нагрузку ($\cos \varphi = 1$), например, установки для электротепловой обработки железобетонных изделий электродным методом.

Однако на практике возможно применение ЭТКПЧ для электроснабжения на повышенной частоте напряжения установок, представляющих собой реактивную нагрузку $\cos \varphi < 1$: либо активно индуктивную, например: установки индукционного нагрева [104÷108], либо активно – емкостную, например: установки для сушки материалов в электрическом поле повышенной частоты или обработки поверхности изделий и материалов коронным либо тлеющим разрядом [109,110]. Поэтому необходимо выяснить особенности установившихся режимов работы ЭТКПЧ при наличии у потребителя реактивной нагрузки.

Предварительные оценки с использованием литературных сведений показали, что следует учитывать возможность колебания коэффициента мощности в пределах $\cos \varphi = 0,2 \div 1$ как в случае индуктивного, так и емкостного характера нагрузки.

При исследовании режимов работы ЭТКПЧ с реактивной нагрузкой целесообразно обратить внимание на два важнейших показателя: величина передаваемой потребителю активной мощности и КПД системы электроснабжения. Причем расчетные оценки целесообразно выполнить как для радиальной линии электроснабжения, так и для случая магистральной линии.

При расчетах с использованием методики, представленной в разд. 2.3, сопротивление нагрузки целесообразно описать с помощью следующих соотношений [31,33]:

при индуктивном характере

$$Z_H = R_H + j\omega_k L_H = R_H + jx_{Lk} = R_H + jx_{Lk}, \quad (3.15)$$

при емкостной нагрузке

$$Z_H = R_H - j\frac{1}{\omega_k C_H} = R_H - jx_{ck} = R_H - jx_{ck}, \quad (3.16)$$

где R_H – активное сопротивление нагрузки; $x_{Lk} = \omega_k \cdot L_H$ – индуктивная составляющая сопротивления нагрузки; $x_{ck} = \frac{1}{\omega_k \cdot C_H}$ – емкостная составляющая нагрузки; $\omega_k = 2\pi f_k = 2\pi f_1 k$; f_k – частота гармоники.

Величину индуктивности L_H и емкости C_H реактивных сопротивлений (3.15) и (3.16) при заданном значении $\cos \varphi$ можно определить с помощью соотношений [31,33],

$$L_H = \frac{R_H \operatorname{tg} \varphi}{\omega} = \frac{R_H \operatorname{tg}(\arccos \varphi)}{\omega}, \quad (3.17)$$

$$C_H = \omega \cdot R_H \operatorname{tg} \varphi = \omega R_H \operatorname{tg}(\arccos \varphi), \quad (3.18)$$

где $\omega = 2\pi f_1$; f_1 – частота рабочего напряжения (частота первой гармоники).

Таким образом, задаваясь значением $\cos\varphi=0,2\div 1$ можно рассчитать зависимости величины полного сопротивления, от угла φ используя формулы (3.15),(3.16),(3.17) и (3.18). Затем полученные значения Z_H используются для выполнения электрического расчета ЭТКПЧ с помощью предложенной методики (гл. 2) с определением искомых показателей: величина передаваемой в нагрузку активной мощности и КПД системы электроснабжения.

На рис. 3.29 представлены расчетные зависимости мощности и КПД от угла φ применительно к параметрам существующей лабораторной установки ЭТКПЧ радиального типа. На рис. 3.30 и 3.31 приведены аналогичные зависимости для случая магистральной схемы при: $Z_{H1} = Z_{H2}$, $\ell_{к1} = \ell_{к2} = 30_M$ (рис. 3.30) и $\ell_{к1} = \ell_{к2} = 80_M$ (рис. 3.31).

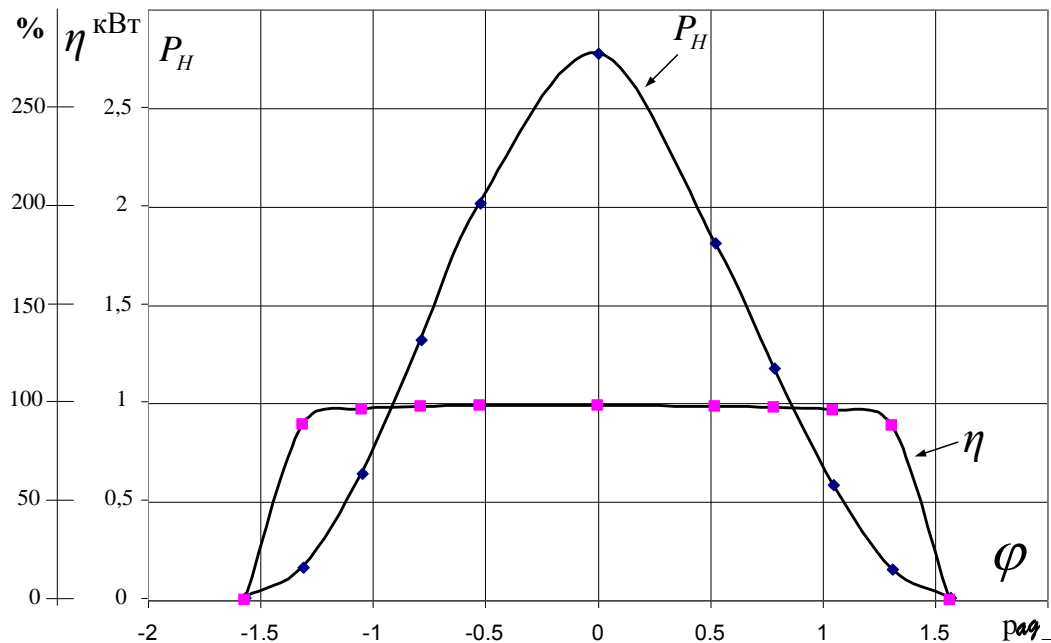


Рис. 3.30 Зависимости активной мощности P_H , передаваемой в нагрузку, и КПД η от угла φ для системы электроснабжения радиального типа при неизменном значении активной составляющей сопротивления нагрузки: $\ell_k = 40_M$; $f = 13$ кГц; $U_{ex} = 250$ В.

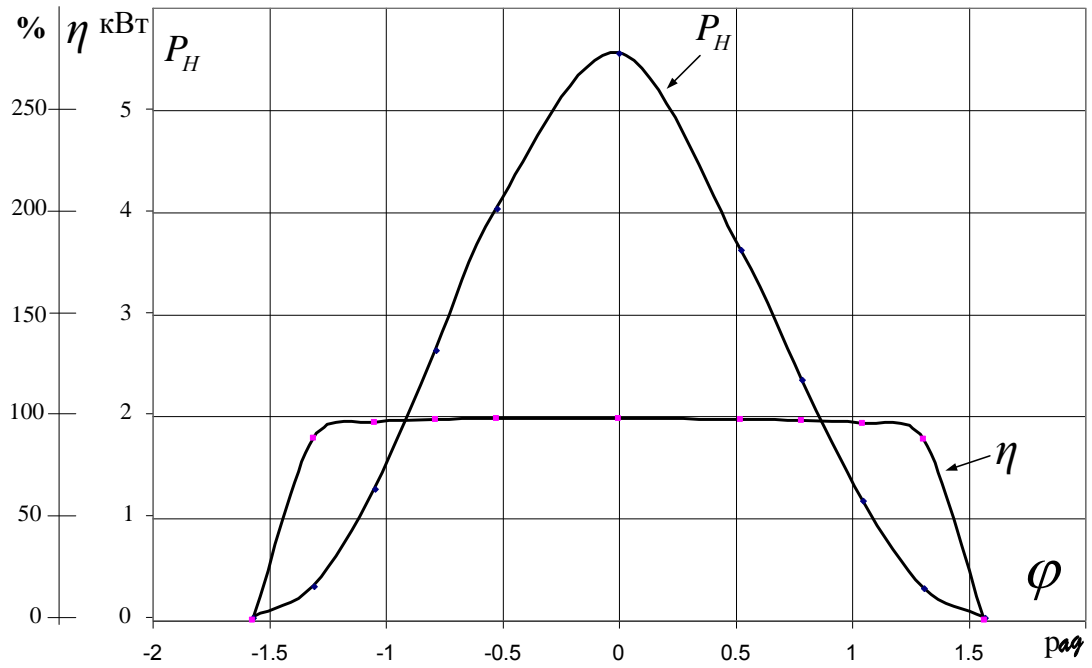


Рис. 3.31 Зависимости активной мощности P_H , передаваемой в нагрузку, и КПД η от угла φ для системы электроснабжения магистрального типа при неизменном значении активной составляющей сопротивления нагрузки: $l_{к1} = l_{к2} = 30_M$; $f = 13\text{кГц}$; $U_{ax} = 250\text{ В}$

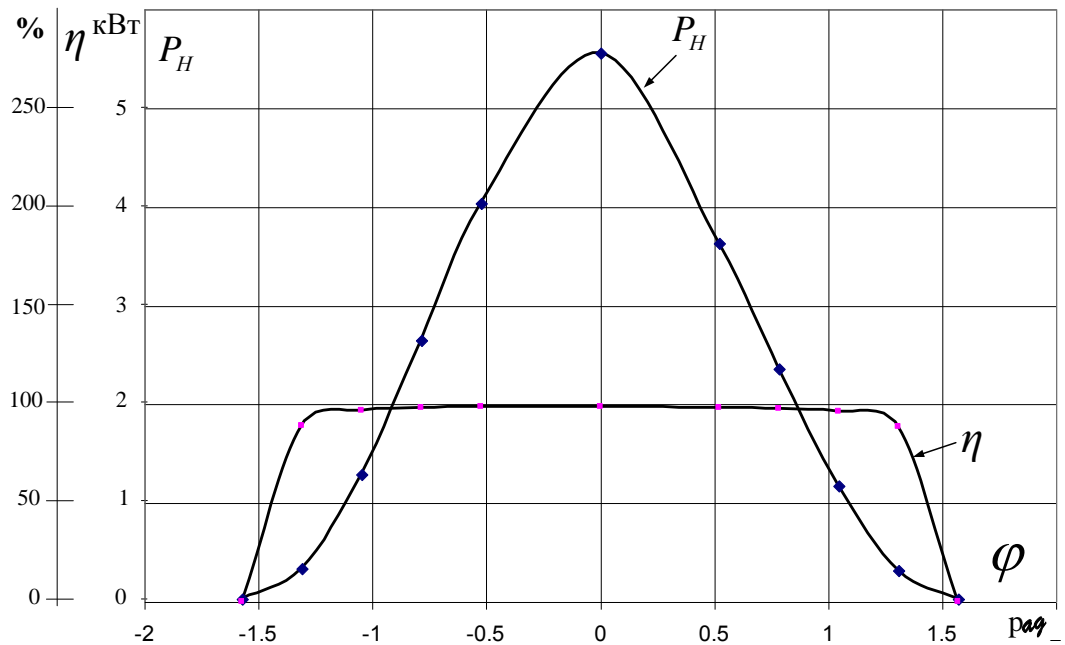


Рис. 3.32 Зависимости активной мощности P_H , передаваемой в нагрузку, и КПД η от угла φ для системы электроснабжения магистрального типа при неизменном значении активной составляющей сопротивления нагрузки: $l_{к1} = l_{к2} = 80_M$; $f = 13\text{кГц}$; $U_{ax} = 250\text{ В}$

Результаты, представленные на рис. 3.29÷3.31, свидетельствуют о том, что изменение длины кабельной линии в указанных пределах слабо влияет на характеристики системы электроснабжения при работе на реактивную нагрузку, а величина угла φ имеет очень сильное воздействие на величину передаваемой активной мощности при неизменной активной составляющей нагрузки.

3.6. Выводы по гл.3

Выполненные теоретические исследования, результаты которых представлены в этой главе, позволяют сделать выводы.

1. Результаты исследования параметров кабельных линии повышенной частоты двухпроводной (перспективной) конструкции показали их преимущество по сравнению с коаксиальными кабелями. Например, у двухпроводных кабелей с твердой изоляцией отдельно каждой жилы погонная емкость приблизительно в 2,5 – 4,5 раза ниже величины этого параметра для коаксиальных кабелей. В случае двух проводных кабелей с воздушной изоляцией это снижение составляет приблизительно один порядок. Соответственно будет уменьшаться реактивная мощность в линии, а также её неблагоприятные последствия при работе линии на повышенных частотах.

2. При сравнении зависимостей внутреннего сопротивления, полученных с помощью, предложенной в настоящей работе формулы, и выражения полученного ранее, установлено значительное расхождение между ними. Например, при использовании предложенной формулы значение этого параметра приблизительно на 70% выше. Вычисления с использованием этой формулы показали лучшее согласование с результатами ранее выполненных экспериментальных исследований по различным параметрами: величина

напряжения, активной мощности, КПД и др. Таким образом, использование предложенного в настоящей работе соотношения позволяет повысить точность вычисления.

3. Весьма сложной задачей теоретических разработок явилось получение аналитического выражения интеграла для определения амплитуды гармоник разложения в ряд Фурье несинусоидальной кривой ЭДС преобразователя напряжения. Эта операция занимает ключевое положение в методике электрического расчета ЭТКПЧ, основанной на принципах частотного анализа. Применение аналитических выражений позволяет при выполнении вычислений отказаться от использования многократного численного интегрирования. В результате такой модернизации удалось многократно уменьшить затраты времени на вычисления (с нескольких часов до нескольких минут), т.е. повысить производительность расчетных работ и точность расчетов.

3. С помощью разработанной методики электрического расчета магистральной высоковольтной линии электроснабжения с питанием от транзисторного преобразователя напряжения большой мощности [82,83,111] 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%.

4. Предложенная в работе расчетная методика [82,83,111] позволила также выполнить всесторонние теоретические исследования характеристик установившегося режима работы высоковольтной магистральной системы электроснабжения повышенной частоты применительно к существующему лабораторному макету такой установки. Результаты этих исследований показывают высокую стабильность величины рабочих напряжений в

различных точках установки даже при 2-х кратной перегрузке. КПД установки при ее работе с мощностью, не превышающей номинальное значение, имеет величину не менее 98%, а при 2-х кратной перегрузке снижается до величины не меньше 96,5%, т.е. остается достаточно высоким. Определены значения предельной длины кабельной линии исходя из допустимого нагрева изоляции при различной величине передаваемой мощности.

5. Исследованы характеристики высоковольтной линии повышенной частоты при работе на реактивную нагрузку, которые показывают существенные отличия этого режима от случая, когда нагрузка имеет число активный характер. При реактивной нагрузке условия работы устройства заметно усложняются. Тем не менее, установка имеет приемлемые показатели для практического применения. Однако, целесообразно дальнейшее исследование характеристик такого устройства при работе на реактивную нагрузку.

Глава 4. Экспериментальные исследования и оценка характеристик вариантов промышленного применения ЭТКПЧ

Результаты теоретических исследований характеристик ЭТКПЧ в виде магистральных линий и их высоковольтных кабельных линий, выполненные с помощью методик как предложенных в настоящей работе, так разработанных ранее, свидетельствуют о высоких технических показателях таких устройств. Однако доверять таким результатам, можно лишь при условии достоверности выполненных теоретических разработок (гл. 2), которая может быть подтверждена посредством экспериментов.

Эти соображения явились причиной проведения опытных измерений и экспериментальных исследований в целях проверки теоретических разработок, кроме этого, эксперимент является источником дополнительных сведений, необходимых для успешного применения теоретических разработок. К их числу можно отнести характеристики IGBT транзисторов, позволяющие определить значение граничной частоты f_a такого электронного прибора, необходимое для точного расчета внутреннего сопротивления $Z_{вн}$ транзисторного преобразователя напряжения (разд. 2.1). В настоящее время не существует математическая модель, позволяющая определять значение f_a посредством расчета.

Кроме этого, в настоящее время можно только с помощью эксперимента оценить влияния электромагнитного экрана на величину потерь электроэнергии в двухпроводных кабелях (рис. 2.6)

Получив подтверждение достоверности теоретических разработок, представленных в настоящей работе, можно будет применить их для разработки вариантов промышленного применения ЭТКПЧ в виде систем электроснабжения магистрального типа и выполнить исследования характеристик таких устройств в целях составления рекомендаций по практическому применению полученных результатов.

4.1. Исследование параметров кабельных линий и характеристик силовых электронных компонентов систем электроснабжения повышенной частоты

Безусловно, при рассмотрении характеристик кабельных линий повышенной частоты интерес представляет опытная проверка методики расчета параметров перспективной двухпроводной кабельной линии в виде двух токоведущих жил с отдельной изоляцией каждой жилы в общем электромагнитном экране (разд. 2.3 и 3.1).

В целях проверки предложенной методики расчета параметров высоковольтной кабельной линии (разд. 2.3) 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. В ходе измерений прибор подключался к жилам в начале кабеля при КЗ в конце, когда измерялась индуктивность, или при ХХ, когда измерялась емкость. Результаты расчетов и экспериментов приведены в табл. 4.1.

Анализ этих результатов (табл. 4.1) позволяет сделать вывод, что для значений погонной емкости наблюдается хорошее согласование расчетных и опытных величин, учитывая возможное отклонение фактической относительной диэлектрической проницаемости ϵ_{rd} относительно усредненных значений, использованных в расчетах и приведенных в табл. 4.1. Это свидетельствует о достоверности предложенной методики расчета этого параметра с использованием выражений (2.52), (2.57) и (2.68). Однако в отношении погонной индуктивности подобное согласование отсутствует: расчет дает более низкие значения, а расхождение между расчетными и опытными величинами может превышать двукратное значение. Это свидетельствует о необходимости специального изучения

этого вопроса в рамках отдельного исследования и корректировки методики вычисления этого параметра.

Таблица 4.1

Результаты расчетного и опытного определения параметров 2-х проводных кабелей

Тип и конструкция кабеля	Длина кабеля, м	R_{Σ} , мм	r_0 , мм	$R_{ИЗ} = d$, мм	Материал изоляции	ϵ_{rd}	Результаты измерения		C_0 , пФ/м		L_0 , мкГн/м		Z Ом
							Емкость изоляции, пФ	Индуктивность, мкГн	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	
Рис.2,а	1,6	5	0,8	2	Полиэтилен	2,4	113	2	70,6	76,5	1,25	0,54	133
Рис.2,а	8,3	4,5	0,5	1	Эл.техн. резина	2,9	936	10	112,8	114,3	1,2	0,54	104
П-276, Рис.2,б	32,25	2	0,5	1	Полиэтилен	2,4	1829	40	56,24	56,31	1,23	0,38	148
Двухпроводный кабель в стальной трубе, рис.2,в	3	9,53	0,6	1,5	Винипласт	4	259	3	86,3	83	1	0,68	108
Тот же кабель на воздухе	3	-	0,6	1,5	Винипласт	4	250	3	83,3		1		
Двухпроводный кабель в алюминиевой трубе, рис.2,в	3	5,3	0,6	1,5	Винипласт	4	319 294	3,33	89	86	1,11	0,48	112

Ранее предложенная методика расчета электрических цепей с питанием от мощных преобразователей [27] и усовершенствованная в настоящей работе (разд. 2.1), предполагает знание граничной частоты IGBT транзисторов или транзисторных модулей f_a . Существующее техническое описание современных IGBT модулей (транзисторов) не содержит сведений о величине граничной частоты, также отсутствует возможность ее получения теоретическим способом. Поэтому единственно возможным способ определения данного параметра – это эксперимент. В целях изучения возможностей экспериментального метода были выполнены опыты по исследованию частотных характеристик IGBT транзисторов типа IRG7PH42UD и IRG4PSH71UD [77,82]. На рис. 4.1 показана схема экспериментальной установки, которая представляет собой каскад усиления, собранный на одном IGBT транзисторе по схеме с общим коллектором.

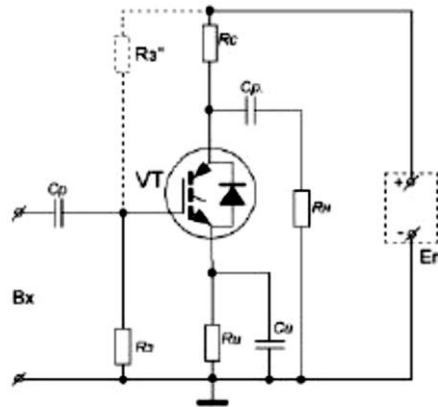


Рис. 4.1. Принципиальная электрическая схема установки по исследованию частотных характеристик IGBT модулей: C_p – разделительный конденсатор; R_z – сопротивление затвора; R_c, R_u – сопротивление стока и истока; C_u – ёмкость истока, R_n – сопротивление нагрузки, VT – IGBT транзистор

Как известно, в режимах усиления полевые транзисторы, установленные на входе IGBT транзистора, работает без входных токов и поэтому IGBT транзистор является прибором, управляемым напряжением затвора. Оптимальные условия работы IGBT транзистора в схеме рис. 4.1 в ходе эксперимента обеспечиваются при подаче на затвор определённого по знаку и величине постоянного напряжения смещения изменением величины

резисторов R_3 , R_3'' и R_u . Рабочая точка выбирается на наиболее крутом и линейном участке характеристики транзистора. Нагрузкой каскада по постоянному току является резистор R_c . Для получения нужного по знаку и величине смещения при использовании IGBT транзисторов в цепь истока включается резистор R_u , на котором постоянная составляющая выходного тока i_c создаёт напряжение, равное необходимому смещению $U_{zo} = i_c \cdot R_u$. При этом резистор R_3 соединяет управляющий электрод (затвор) с общей для входа и выхода заземленной точкой. Небольшие токи утечки на этом резисторе не должны создавать заметного напряжения $i_{ym} \cdot R_3 \approx 0$, т.е. величина R_3 должна быть ограничена и указывается в справочнике для используемых транзисторов. Током утечки i_{ym} является обратный ток запертого р-п перехода затвор-канал. Резистор в цепи истока шунтируют большей ёмкостью C_u , замкнутой на сопротивление R_n для выделения переменной составляющей на выходе каскада. Для увеличения стабильности, введена отрицательная обратная связь по постоянному току путём включения делителя в цепь затвора (R_3'' пунктир рис. 4.1). В процессе эксперимента на вход каскада подавалось переменное синусоидальное напряжение от лабораторного генератора с изменяемой частотой. Производилось измерение величины переменного напряжения на входе и выходе каскада и определялся коэффициент усиления как отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, выраженное в о.е., при различной частоте. В результате были получены амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) IGBT транзисторов, которые графически представлены на рис. 4.2.

Полученные зависимости (рис. 4.2) позволили определить значение граничной частоты из условия уменьшения коэффициента усиления в $\sqrt{2}$ раз, которое, как оказалось, в обоих случаях имеет приблизительно одинаковую величину – около 80 кГц . Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки автоматизированных устройств измерения частотных характеристик IGBT транзисторов и являются основой для

создания математических моделей в целях получения этих характеристик посредством расчета.

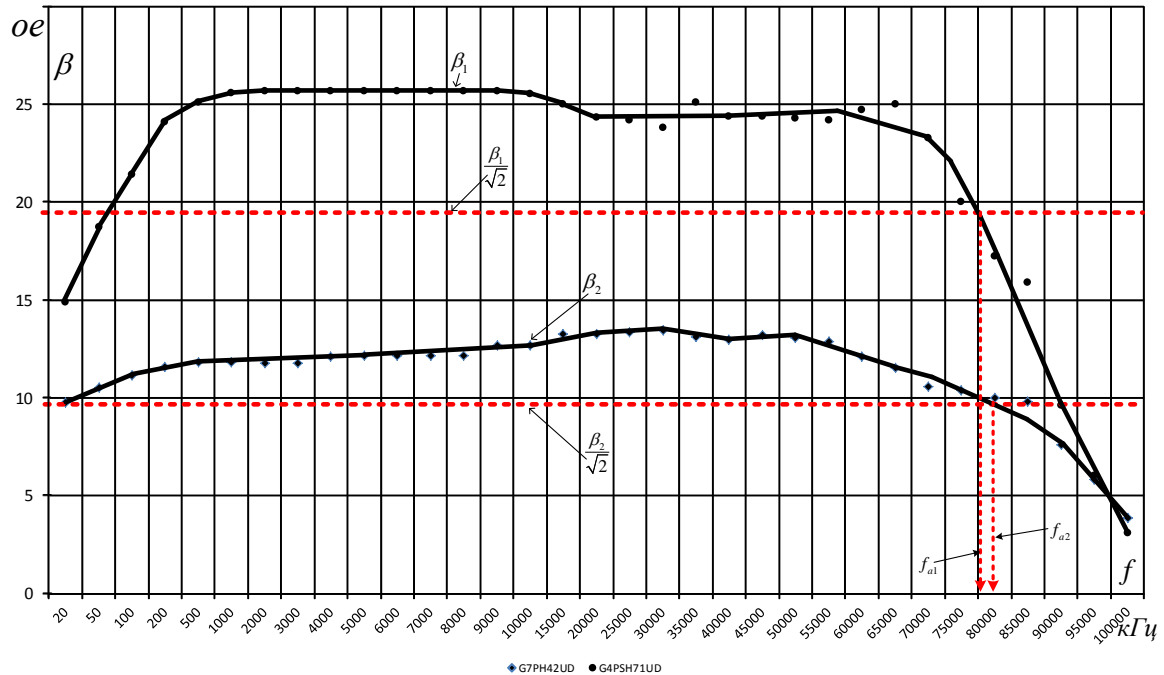


Рис.4.2. Амплитудно-частотные характеристики IGBT транзисторов: β_1 – IRG4PSH71UD; β_2 – IRG7PH42UD; $f_a \approx f_{a1} \approx f_{a2} \approx 80$ кГц

Как показано в разд. 3.1, двухпроводные кабели с общим экраном могут оказаться более удобными и эффективными для использования в системах электроснабжения повышенной частоты по сравнению коаксиальными кабелями. Однако существует опасение, что при эксплуатации таких двухпроводных кабельных линий будет наблюдаться заметное увеличение потерь электроэнергии (мощности) на повышенных частотах, которые вызваны протеканием вихревых токов в экране, индуцированных магнитным полем токов проводников кабеля. С другой стороны, при равенстве величины токов в проводниках кабеля теоретически такие потери должны отсутствовать. Действительно, каждый из проводников будет создавать в экране магнитные потоки одинаковой величины, направленные встречно. Поскольку результирующей поток будет отсутствовать (равен нулю), будут

отсутствовать вихревые токи и вызванные ими потери. Таким образом, при увеличении частоты рабочего напряжения таких кабельных линий, по крайней мере, не должно возникать какого-то катастрофического увеличения потерь.

Для того, чтобы устранить сомнения по этому вопросу был выполнен эксперимент, электрическая схема которого представлена на рис. 4.3

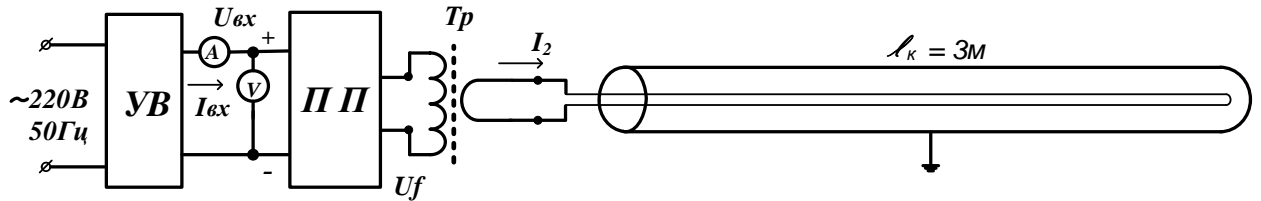


Рис. 4.3. Электрическая схема опыта по определению влияния электромагнитного экрана на величину потерь электроэнергии (мощности) в двухпроводной кабельной линии повышенной частоты

Согласно этой схеме (рис. 4.3) напряжение подается от питающей сети 220В 50Гц через управляемый выпрямитель *УВ* на транзисторный преобразователь напряжения *П П* выходное напряжение преобразователя повышенной частоты U_f приложено к первичной обмотке понижающего силового трансформатора *Тр* повышенной частоты. Число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора имеет величину $W_1 = 26$; $W_2 = 2$, соответственно. Вторичная обмотка подключала к отрезку двухпроводной линии (рис. 4.3) длиной $l_k = 3_m$, которая была замкнута накоротко в конце, и поочередно размещалась на воздухе, в стальной трубе 3/4" и в немагнитном (алюминиевом) экране.

В каждом случае выполнялись одинаковые опыты. После включения установки производилось плавное повышение напряжением $U_{вх}$ (рис. 4.3) и регистрировать значения $U_{вх}$ и $I_{вх}$, а также мощности на входе преобразователя

$$P_{вх} = U_{вх} \cdot I_{вх}, \quad (4.1)$$

Определялось расчетное значение тока вторичной обмотки I_2 , т.е. тока, протекающего в жилах кабеля!

$$I_2 \approx I_{ex} K_{TP}, \quad (4.2)$$

где $K_{TP} = W_1 / W_2 = 13$ – коэффициент трансформации силового трансформатора T_p (рис. 4.3).

Результаты такого эксперимента представлены на рис. 4.4

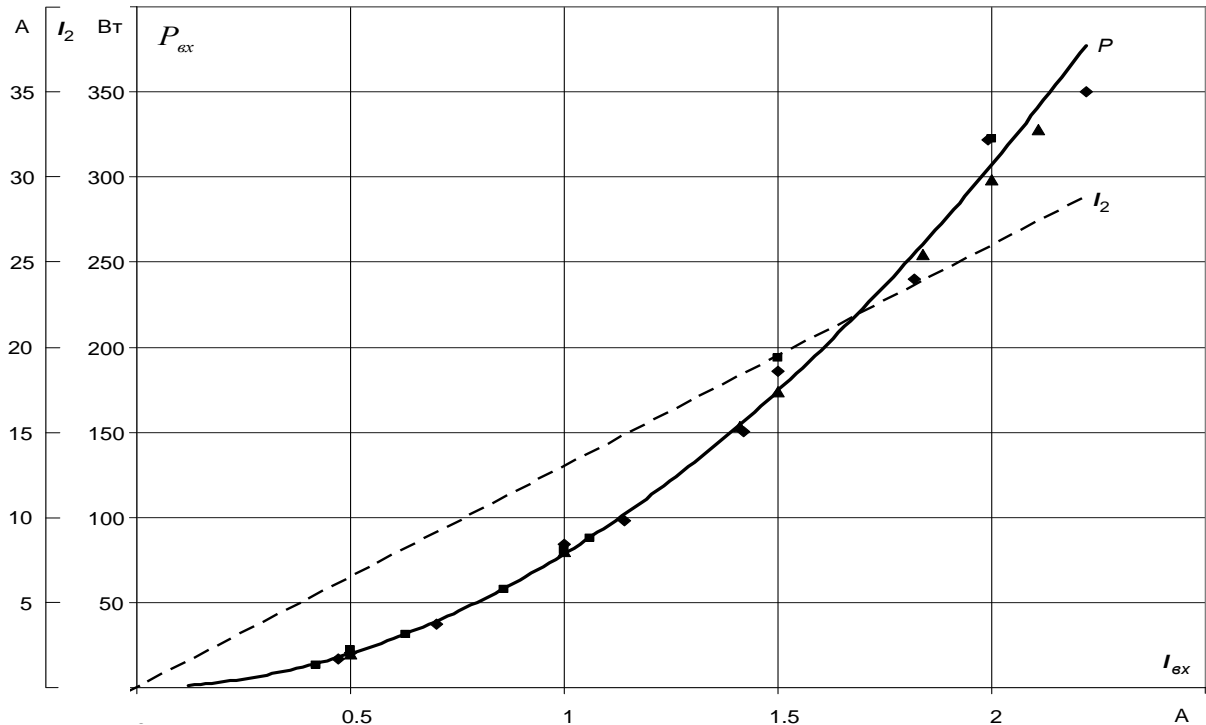


Рис. 4.4. Зависимость мощности на входе в полупроводниковый преобразователь (ПП) P , величины тока на выходе силового трансформатора i_2 (рис. 4.3) от величины тока на входе ПП: \blacklozenge – без экрана (на воздухе); \blacktriangle – в стальной трубе; \blacksquare – в алюминиевом экране

Как видно из рис. 4.4, экспериментальные значения, полученные для различных условий, можно представить одной общей зависимостью. Это позволяет сделать вывод об отсутствии влияния наличия и вида экрана на величину потерь в 2 – х проводной экранированной линии, что подтверждает высказанное выше теоретические соображения. Действительно, если бы наличие и вид материала экрана оказывали заметное влияние на величину потерь в линии повышенной частоты, то на рис. 4.4 было бы получено несколько зависимостей, а не одна. Характерно, что такой результат достигнут при существенных значениях тока в макете кабельной линии – до 30 А.

4.2. Методика экспериментальных исследований характеристик систем электроснабжения повышенной частоты

В целях опытной проверки достоверности предложенной в настоящей работе методики электрического расчета ЭТКПЧ в виде магистральной линии электроснабжения повышенной частоты (разд. 2.2, 2.3), а также других теоретических методик (гл. 2) были выполнены разработка, изготовление элементов, сборка и наладка экспериментальной установки, принципиальная электрическая которой представлена на рис. 4.5

Эта установка представляет собой действующий макет высоковольтного электротехнического комплекса пригодный для выполнения экспериментов, как лабораторных условиях, так и в производственных условиях любого промышленного предприятия.

Питание установки осуществляется от сети переменного тока 220 В 50 Гц. При включении автоматического выключателя $SF1$. Сетевое напряжение подается на силовой управляемый выпрямитель, выполненный по мостовой схеме с использованием диодов $VD1$, $VD2$ и тиристоров $VS1$, $VS2$. Одновременно питающее напряжение подается на схему управления тиристорами ($Tr4$, $VD3-4$, $VT5-VT6$) и схему задающего генератора ($Tr7$, $VD8-VD11$, $VT7-VT9$, $DA1$, $DA2$), а также схему индикации включения установки ($R9$, $C5$, $VD12$). С выхода схемы управления (развязки $C3, R5$ и $C4, R8$) управляющие импульсы подаются на управляющие электроды силовых тиристоров $VS1$ и $VS2$, обеспечивающие их отпирание. Фаза отпирания тиристоров, а, следовательно, величина выпрямленного напряжения U_{ex} плавно изменяется от нуля до наибольшего значения $U_{ex} \approx 260$ В с помощью резистора $R4$. Регулируемое выпрямленное напряжение сглаживается с помощью конденсатора $C1$, который выполнен в виде блока электролитических конденсаторов.

Регулируемое выпрямленное напряжение подается на вход мощного транзисторного преобразователя напряжения, собранного по мостовой схеме с использованием силовых IGBT транзисторов VT1-VT4 типа IRG4PH50KD, IRG4PH50UDPBF, IRG4PSH71UDPBF, IRG7PH42UD и IRG7PH46UD, который преобразует постоянное напряжение в переменное несинусоидальное напряжение повышенной частоты кГц. Управление транзисторами осуществляется от задающего генератора, собранного на микросхеме DA2 с усилителем на транзисторах VT8÷VT9. Управляющее напряжение, имеющее осциллограмму прямоугольной формы с паузой, подается на базу транзисторов VT1÷VT4 через согласующий трансформатор Tr5, что обеспечивает правильную работу этих транзисторов в ключевом режиме.

Напряжение с выхода преобразователя подается на первичную обмотку повышающего силового трансформатора повышенной частоты $Tr1$, имеющего коэффициент трансформации $K_{TP} = 5$. Высокое напряжение повышенной частоты, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора $Tr1$ подается в высоковольтную кабельную линию. В конце первого участка $l_{к1}$ кабельной линии и в точке соединения с началом второго участка $l_{к2}$ подключен понижающий трансформатор $Tr2$, с вторичной обмотки которого напряжение приложено к нагрузке $Z_{н1}$.

В конце второго участка $l_{к2}$ также подключен понижающий трансформатор $Tr3$ с нагрузкой $Z_{н2}$ на вторичной обмотке.

Вольтметр V и амперметр A служат для измерения напряжения U_{ex} и тока I_{ex} на входе полупроводникового преобразователя VT1÷VT4.

Таким образом, экспериментальная установка (рис. 4.5) представляет высоковольтный ЭТКПЧ, выполненный в виде линии электроснабжения магистрального типа с одной промежуточной точкой отбора мощности.

Несмотря на достаточно простую конструкцию, такая установка позволяет изучать режимы работы системы электроснабжения

магистрального типа, выявлять их основные закономерности и особенности, делать выводы, которые можно будет распространить на более сложные варианты реализации магистральных систем электроснабжения повышенной частоты.

В ходе выполнения экспериментов производилось измерение напряжения $U_{ex} = U_{=}$ и тока, $I_{ex} = I_{=}$ а также осциллографирование напряжения повышенной частоты в различных точках установки.

На основании измерения напряжения и тока в звене постоянного тока (рис. 4.5) определялась мощность, передаваемая в магистральную линию через транзисторный преобразователь: $P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$ в некоторых случаях для измерения токов повышенной частоты производилось осциллографирование напряжения на безиндуктивном низкоомном шунте, выполненном из нихрома, который включался в разрыв цепи измеряемого тока.

В целях оценки влияния параметров транзисторного преобразователя напряжения на показатели и характеристики системы электроснабжения были разработаны, изготовлены и использованы два варианта таких преобразователей, имеющие одинаковые схемотехнические решения, но различную номинальную мощность (4 и 7 кВт), благодаря использованию в их составе электронных компонентов разной мощности (силовые IGBT транзисторы, диоды, тиристоры) [98]. Внешний вид преобразователей напряжения представлен на рис. 4.6



а)



б)

Рис. 4.6. Внешний вид транзисторных преобразователей напряжения мощностью 4 кВт (а) и 7 кВт (б)

Экспериментальная установка (рис. 4.5) позволяет применять силовые трансформаторы различной мощности конструкции, изменять длину и количество участков, тип применяемых высоковольтных кабелей, мощность и характер нагрузки, как в точках промежуточного отбора мощности, так и в конечной точке и др.

Таким образом, разработанный ЭТКПЧ (рис. 4.5), представляет собой наращиваемую физическую модель электропередачи повышенной частоты, о необходимости которой отмечено в [26] и которая обладает широкими возможностями для проведения научных исследований.

4.3. Электрические характеристики установившихся режимов работы различных схемных решений устройств электроснабжения повышенной частоты

В целях проверки результатов теоретических разработок (гл. 2) были выполнены экспериментальные исследования с использованием разработанной установки (рис. 4.5).

Как было показано в разд. 3.4 (рис. 3.28), для систем электроснабжения существует уровень предельной длины кабельной линии повышенной частоты, определяемый допустимым нагревом изоляции кабеля. Поэтому один из экспериментов был выполнен при общей длине кабельной линии близкой к предельным значениям согласно рис. 3.28 поскольку предполагается, что наиболее тяжелый режим возникает, когда вся нагрузка сосредоточена в конце линия (разд. 3.4), в промежуточной точке нагрузка была отключена ($P_{H1} = 0$), т.е в схеме (рис. 4.5) нагрузка на выходе трансформатора $Tr2$ была отключена.

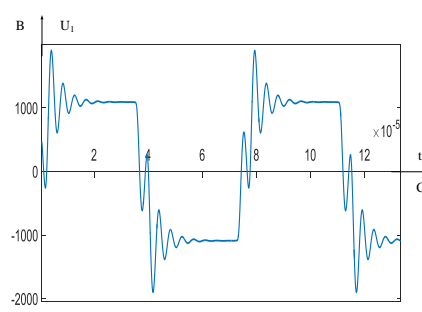
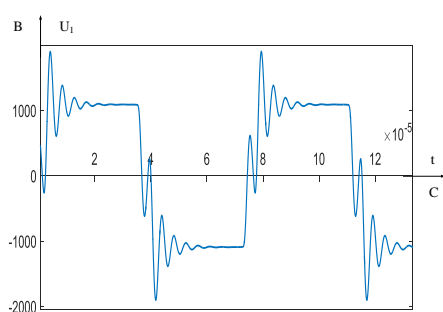
В ходе эксперимента использовалась нагрузка Z_{H2} (рис. 4.5) в виде водонагревателей мощностью по ≈ 1 кВт каждый, включенных параллельно или последовательно на выходе трансформатора $Tr3$ (рис. 4.5). После

включения установки устанавливалось фиксированное значение напряжения U_{ex} в звене постоянного тока (рис. 4.5). Затем производилось осциллографирование напряжения в различных точках схемы, а также электрического тока в начале и в конце линии (с помощью безиндуктивного шунта). Для условий работы кабеля в режиме, близком к допустимому, согласно расчетам, после выдержки во времени выполнялось измерение температуры кабеля на его поверхности в начале, середине и в конце кабельной линии с помощью термопары.

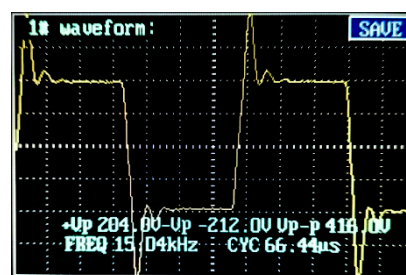
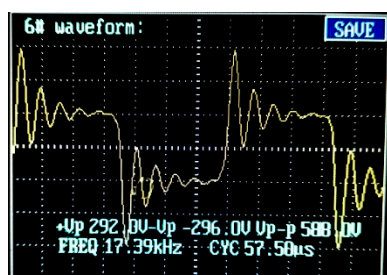
На рис. 4.7 и 4.8 представлены характерные опытные и расчетные осциллограммы напряжения в начале и в конце линии соответственно при различных значениях нагрузки.

На рис. 4.9 и 4.10 приведены аналогичные осциллограммы тока в начале и в конце линии соответственно, а на рис. 4.11 – осциллограммы напряжения на нагрузке для тех же условий.

С использованием осциллографирования (рис. 4.7÷4.9) получены зависимости перечисленных выше параметров, а также мощности (4.3), переданной через полупроводниковый преобразователь напряжения в звене постоянного тока.



Расчет

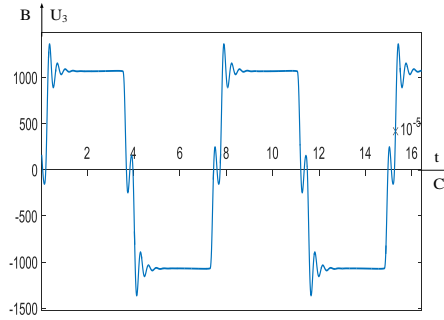
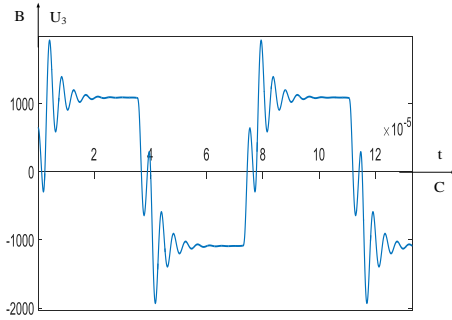


Опыт

Минимальная нагрузка $P_H \approx 300$ Вт

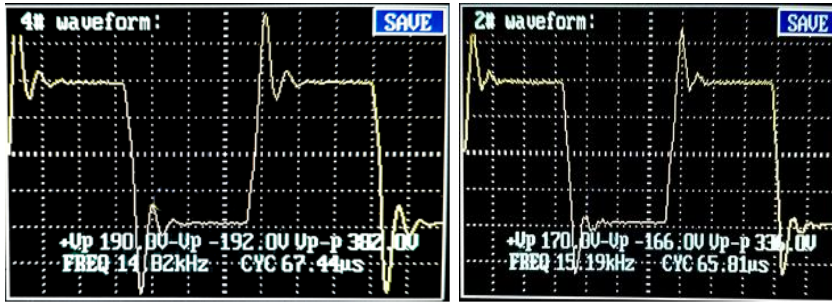
Максимальная нагрузка $P_H \approx 2000$ Вт

Рис. 4.7. Опытные и расчетные осциллограммы напряжения в начале высоковольтной кабельной линии: цена делений на экспериментальных осциллограммах 1000 В/дел (минимальная нагрузка), 500 В/дел (максимальная нагрузка); $U_{ex} = 210$ В



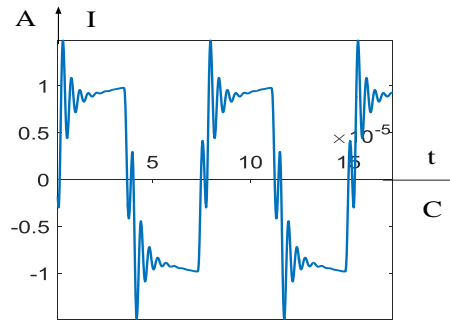
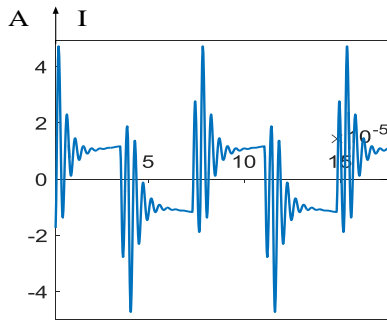
Расчет

Опыт

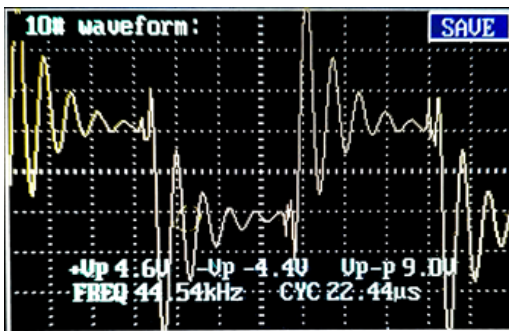


Минимальная нагрузка $P_H \approx 300$ Вт Максимальная нагрузка $P_H \approx 2000$ Вт

Рис. 4.8. Опытные и расчетные осциллограммы тока в конце высоковольтной кабельной линии: цена делений на экспериментальных осциллограммах 500 В/дел; $U_{ex} = 210$ В



Расчет



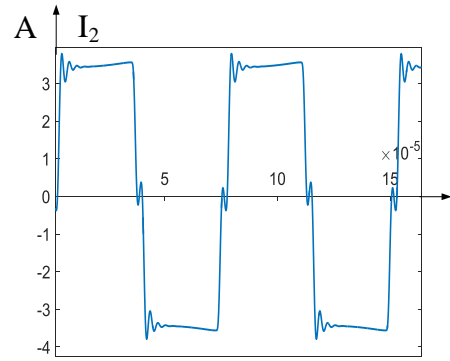
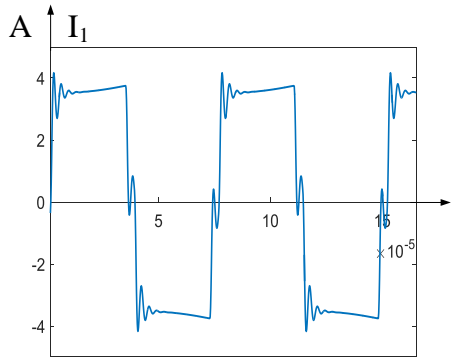
В начале линии



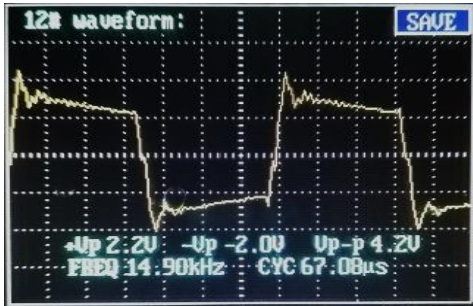
В конце линии

Опыт

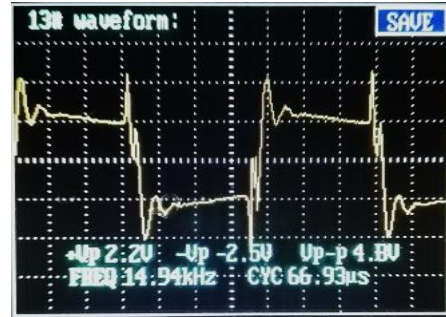
Рис. 4.9. Опытные и расчетные осциллограммы тока в начале и в конце кабельной линии при минимальной нагрузке $P_H \approx 300$ Вт: цена делений на экспериментальных осциллограммах 1 А/дел; $U_{ex} = 210$ В



Расчет



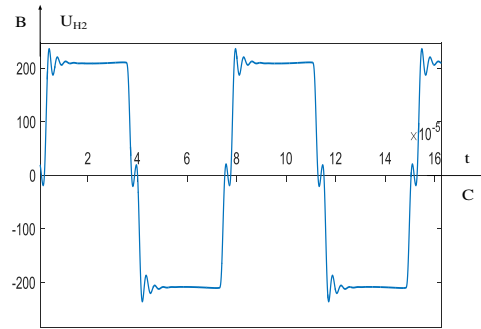
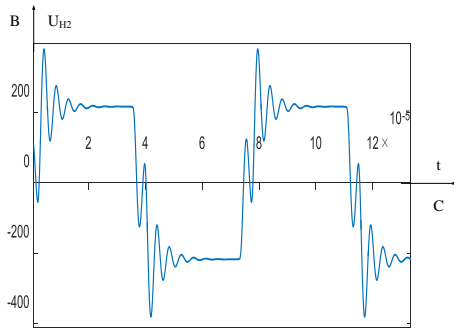
В начале линии



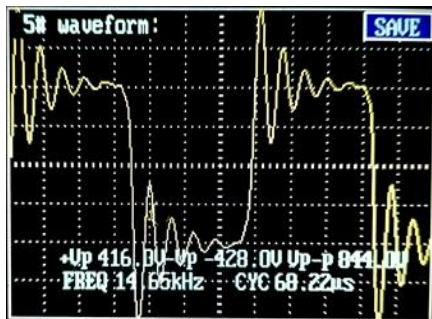
В конце линии

Опыт

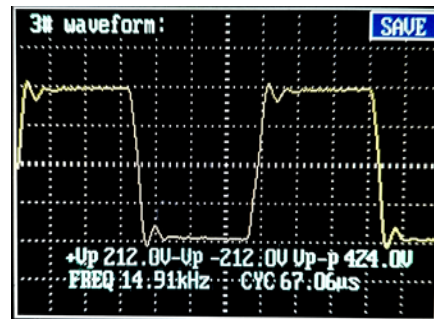
Рис. 4.10. Опытные и расчетные осциллограммы тока в начале и в конце кабельной линии при максимальной нагрузке $P_H \approx 2000$ Вт: цена делений на экспериментальных осциллограммах 3 А/дел; $U_{ex} = 210$ В



Расчет



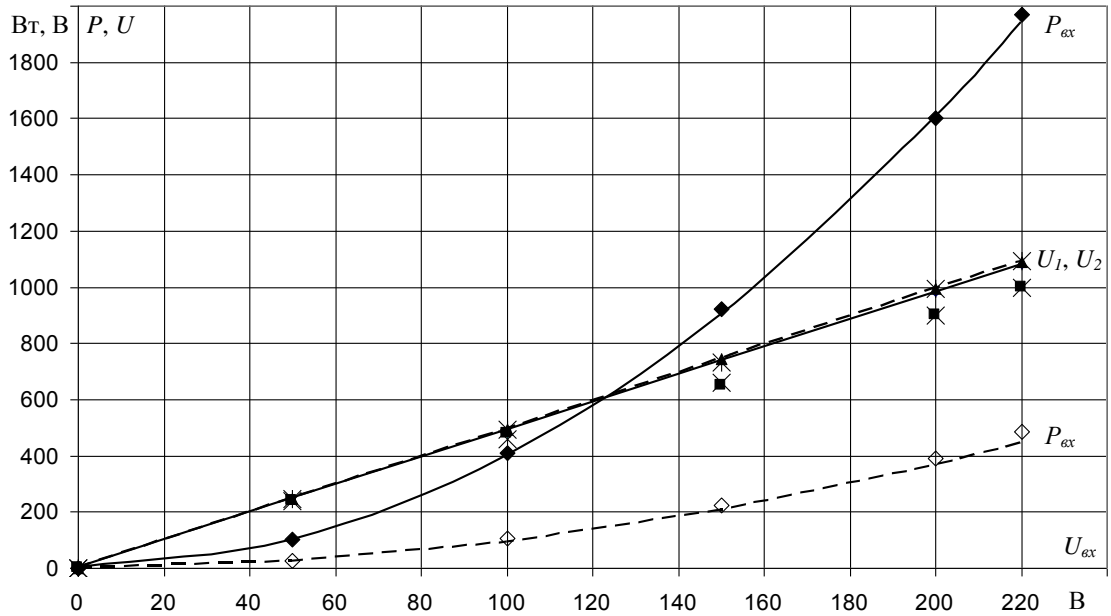
Минимальная нагрузка $P_H \approx 300$ Вт



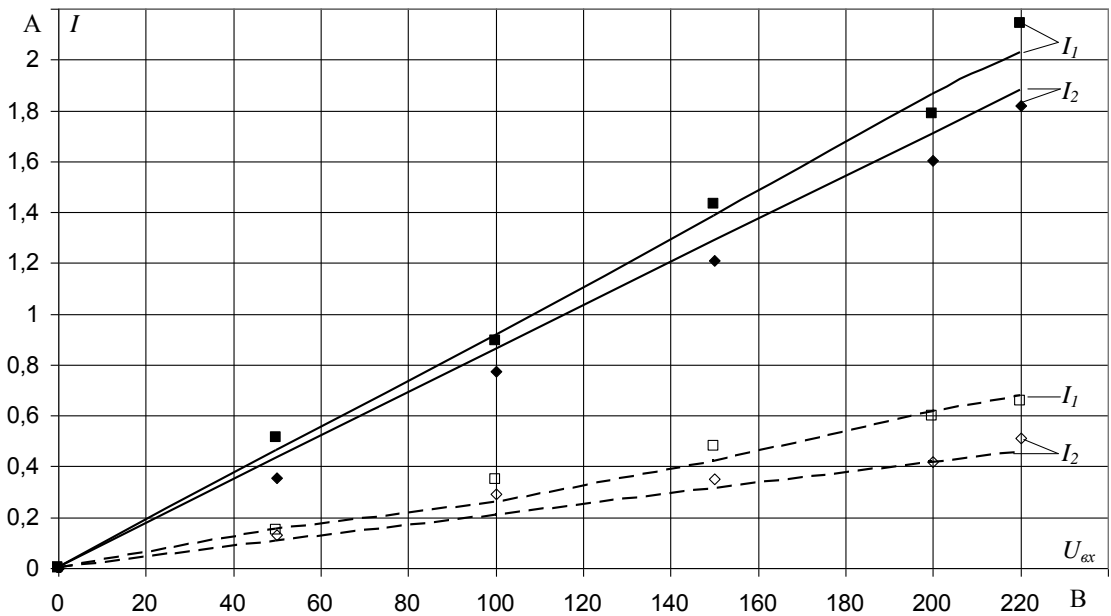
Максимальная нагрузка $P_H \approx 2000$ Вт

Опыт

Рис. 4.11. Опытные и расчетные осциллограммы напряжения на нагрузке: цена делений на экспериментальных осциллограммах 80 В/дел (минимальная нагрузка), 100 В/дел (максимальная нагрузка); $U_{ex} = 210$ В



а)



б)

Рис. 4.12. Зависимости мощности P_{ex} на входе транзисторного преобразователя (VT_{1-4} – рис. 4.5) и напряжений в начале U_1 и в конце U_2 кабельной линии (а), а также тока в начале I_1 и в конце I_2 кабельной линии (б) при максимальной мощности нагрузки $P_{H2} \approx 2000$ Вт (сплошные линии) и минимальной мощности $P_{H2} \approx 400$ Вт (пунктирные линии) от величины напряжения на входе преобразователя $U_{ex} = U_+$ (рис. 4.5): линии – расчет, точки – эксперимент; \blacktriangle , \times – U_1 ; \blacksquare , \times – U_2 ; $P_{H1}=0$

Полученные результаты (рис. 4.7÷4.12) свидетельствуют о хорошем согласовании расчетных и опытных значений, а также о достаточно высокой стабильности рабочего напряжения на линии при пятикратном изменении передаваемой мощности. Кроме этого, зависимости рис. 4.12 демонстрируют различие в величине токов в начале и в конце кабельной линии. Это

полностью подтверждает результаты теоретических исследований (разд. 3.4, рис. 3.28) и подчеркивает целесообразность применения в составе ЭТКПЧ кабелей с уменьшенным значением погонной емкости (разд. 3.1). Кроме вариантов получения этого результата, описанных в разд. 3.1, наилучшим способом достичь такого эффекта является применение газонаполненных кабелей, у которых токоведущая жила выполнена в виде расщепленного провода [93]. Параметры такой кабельной линии можно без труда оценить, используя теоретические соотношения, представленные в [112].

При использовании линий электроснабжения магистрального типа основной интерес представляют их характеристики и показатели под нагрузкой при наличии её как в конце линии, так и в промежуточных точках одновременно.

В целях получения наиболее полной информации эксперимент для такого случая был выполнен с использованием ЭТКПЧ, упрощенная электрическая схема которого представлена на рис. 4.13. Особенностью этой схемы в отличие ранее приведенных (рис. 3.22, 4.5) является то, что нагрузка представляет собой электрические водонагреватели, погруженные в емкость, заполненную водой, на поверхности которой установлена теплоизоляция (поролон, пенопласт). Такая конструкция ЭТКПЧ необходима для того, чтобы наряду с регистрацией и измерением электрических параметров, определять показатели её энергетической эффективности с использованием калориметрического метода [28,86].

На рис. 4.14 и 4.15 представлены характерные опытные и расчетные осциллограммы напряжения и тока в различных точках экспериментальной установки.

Результаты, представленные на рис. 4.14 и 4.15, свидетельствуют о достаточно хорошем согласовании опытных и расчетных осциллограмм, лишь в кривой напряжений на нагрузке и токов в линии расчет демонстрирует большую величину высокочастотной составляющей.

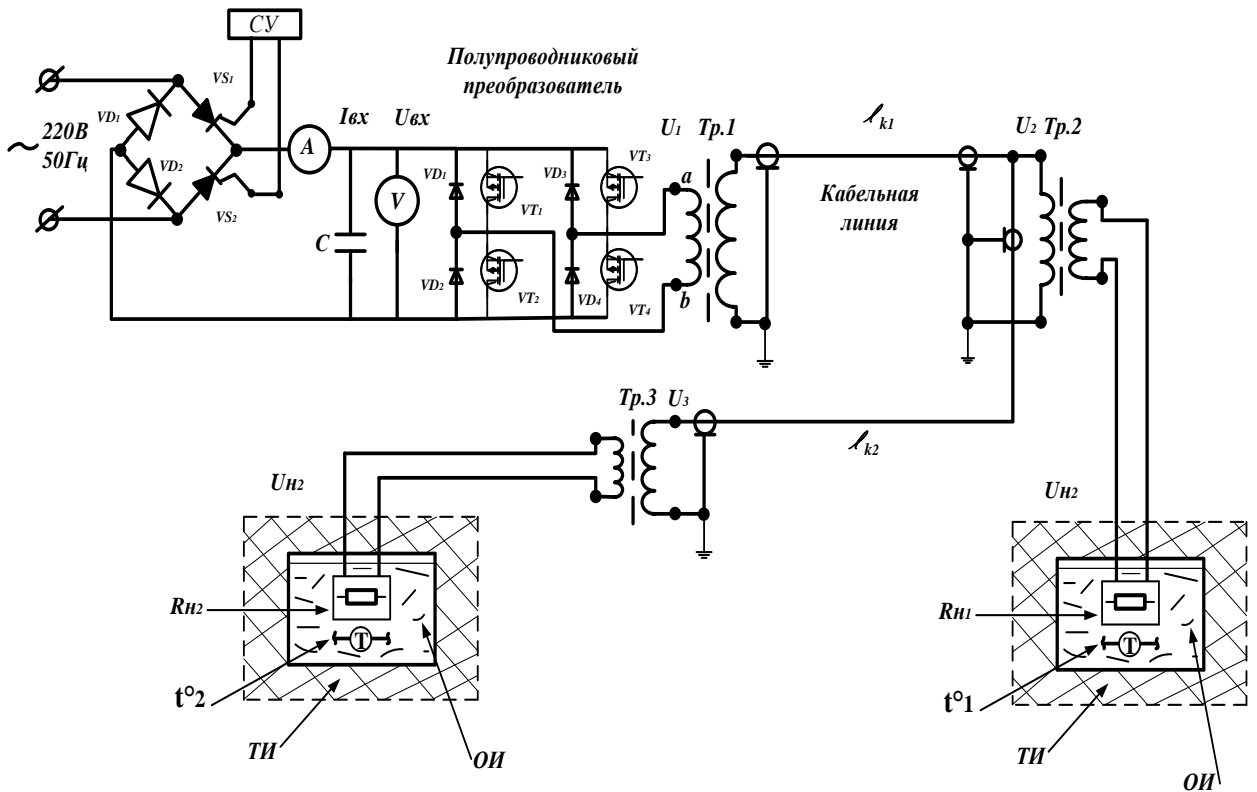
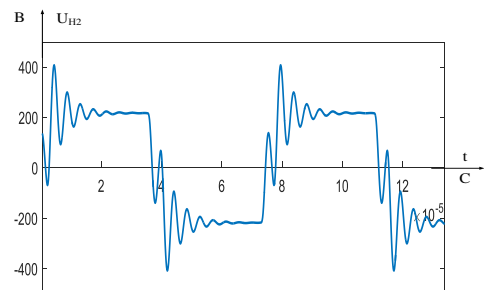
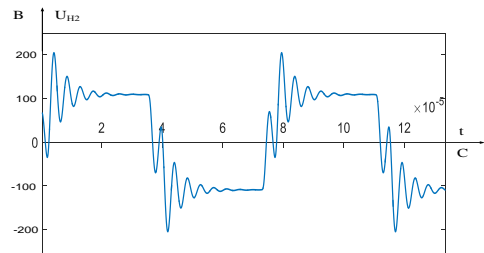
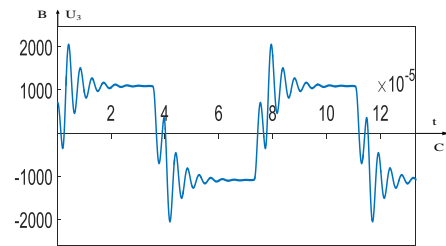
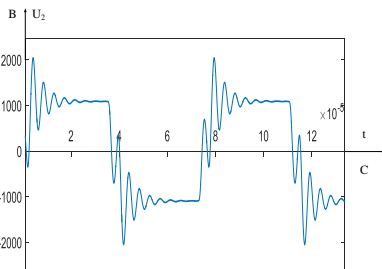
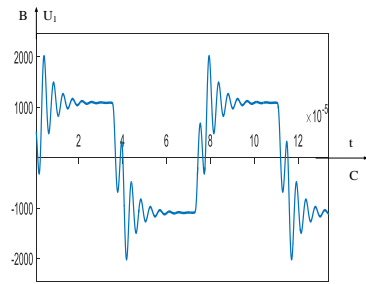
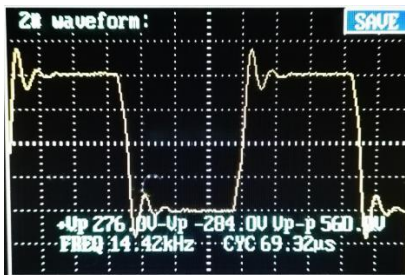
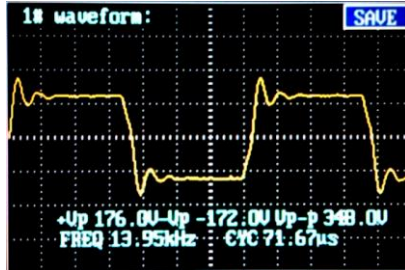
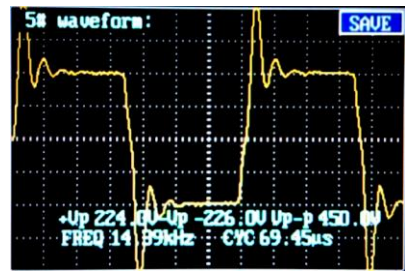
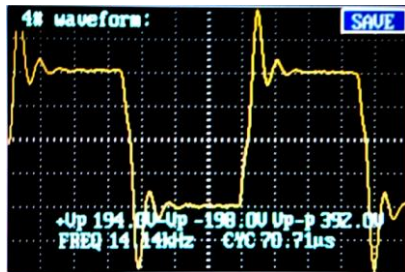
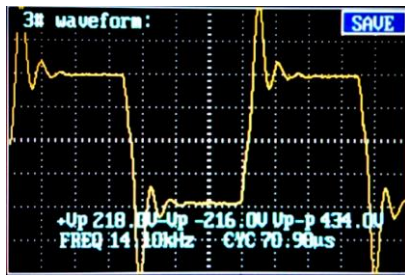


Рис. 4.13. Схема экспериментальной установки при исследовании режимов работы ЭТКПЧ магистрального типа под нагрузкой

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 более 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, передаваемой в нагрузку (на входе транзисторного преобразователя) $P_H = P_{вх}$, которое графически представлено на рис. 4.16

Эти результаты (рис. 4.16) демонстрируют согласование расчетных и опытных значений, полностью подтверждают достоверность предложенной расчетной методики (разд. 2.2, 2.3) и свидетельствуют о высоких эксплуатационных показателях магистральной системы электроснабжения (рис. 4.5, 4.13): малые отклонения рабочего напряжения и высокие значения КПД.



Опыт

Расчет

Рис. 4.14. Опытные (а) и расчетные (б) осциллограммы напряжения при номинальной мощности нагрузки $P_{ном1} = 1 \text{ кВт}$ и $P_{ном2} = 1,2 \text{ кВт}$, $U_{ex} = 210 \text{ В}$: 1 – высокое напряжение в начале кабельной линии (измерение через делитель 1/10); 2 – высокое напряжение в точке промежуточной точки (измерение через делитель 1/10); 3 – высокое напряжение в конце кабельной линии (измерение через делитель 1/10); 4 – напряжение на нагрузке в промежуточной точке; 5 – напряжение на нагрузке в конце линии; масштаб по горизонтали для опытных осциллограмм – 10 мкс/дел; коэффициенты трансформации имеют величину $K_{Tp1} = K_{Tp3} = 5$, $K_{Tp2} = 8$

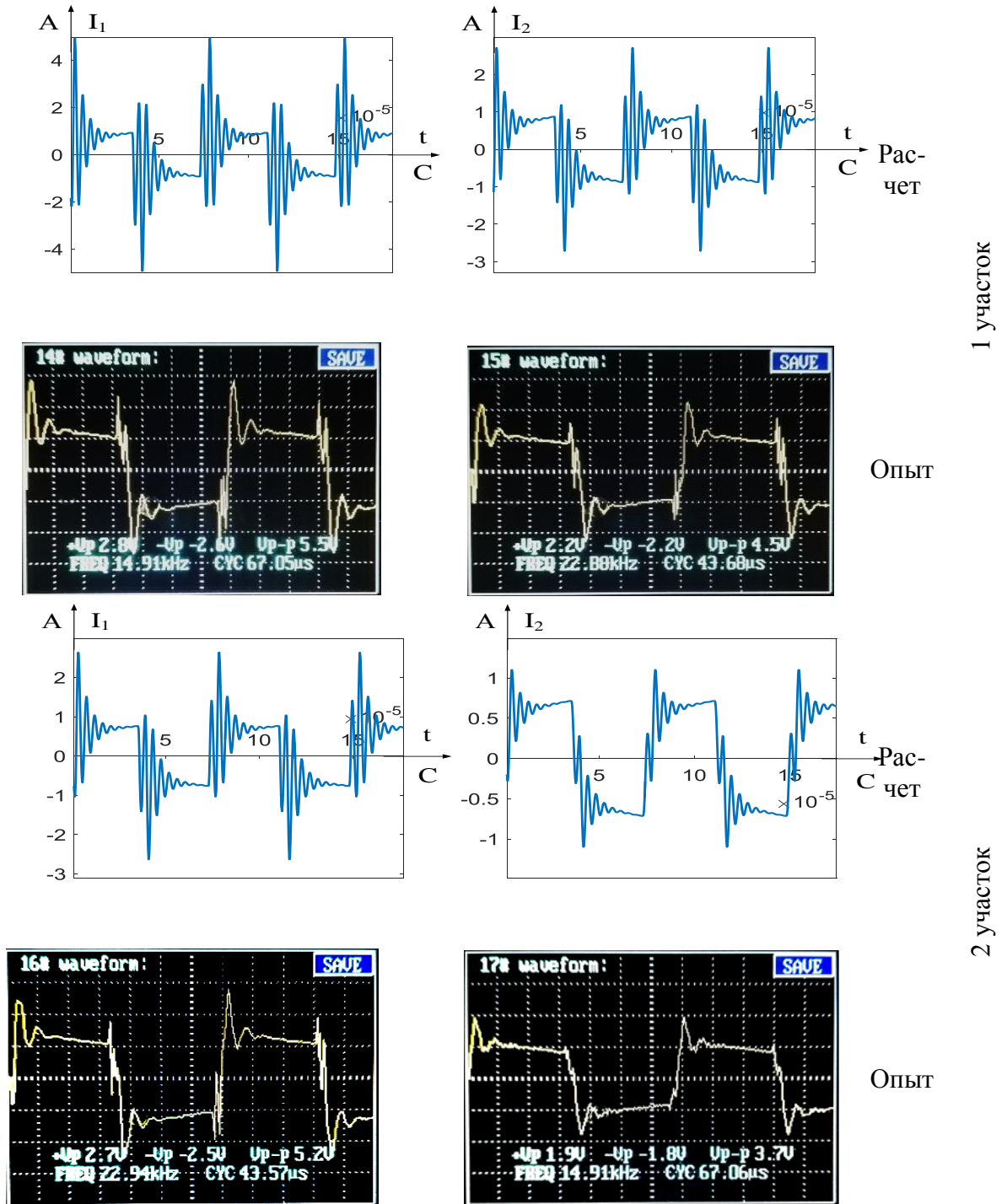


Рис. 4.15. Опытные и расчетные осциллограммы тока на линии в различных точках при $U_{ax} = 210$ В: I_1 – ток в начале участка (слева); I_2 – ток в конце участка (справа); цена больших делений опытных осциллограмм составляет 1,0 А/дел для 1 участка; 0,6 А/дел для 2 участка; $P_{ном1} \approx 0,3$ кВт и $P_{ном2} \approx 0,8$ кВт.

Для сравнения был также выполнен эксперимент с радиальной линией по определению КПД, когда потребитель электроэнергии в промежуточной точке отсутствует (т.е. нагрузка на вторичной обмотке $Tr2$ – отключена – рис. 4.5), а вся нагрузка включена в конце линии (опыт 2).

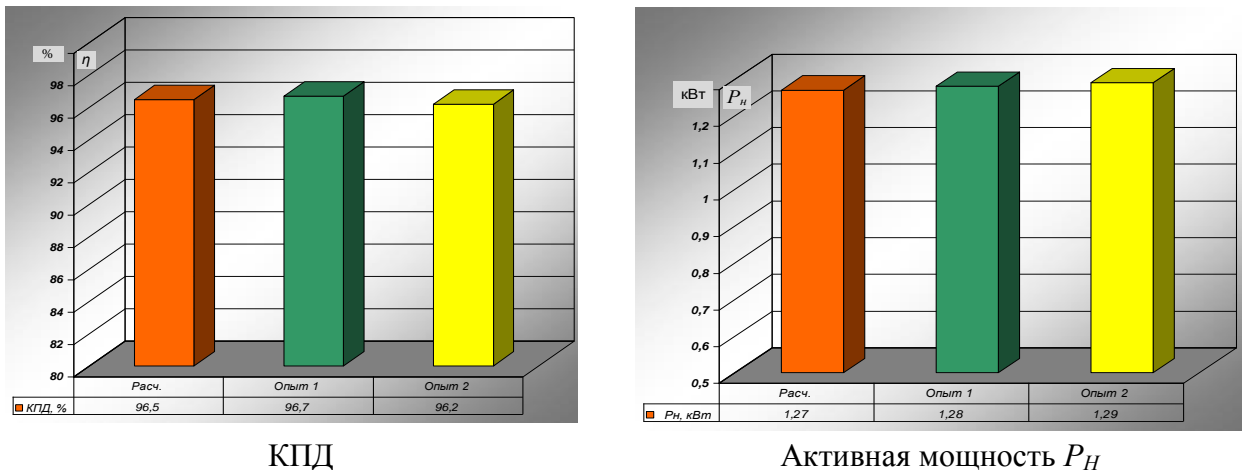


Рис. 4.16. Сравнение опытных и расчетных значений КПД ЭТКПЧ и мощности, передаваемой в нагрузку при $U_{вх} = 220$ В: опыт 1 – $P_{ном1} = 1$ кВт и $P_{ном2} = 1,2$ кВт; опыт 2 – $P_{ном1} = 0$ кВт и $P_{ном2} = 2,2$ кВт.

Результаты этого опыта также отмечены на рис. 4.16, и подтверждают, что магистральные линии не уступают по своим показателям ЭТКПЧ радиального типа.

4.4. Исследование установившихся режимов работы при электроснабжении потребителей с реактивной нагрузкой

Как было отмечено в гл. 3, (разд.3.5), на практике существует случаи, когда ЭТКПЧ могут использоваться для электроснабжения потребителей с реактивной нагрузкой, и были исследованы основные показатели и характеристики таких систем теоретическими методами. Естественно, как и в других случаях, эти результаты нуждаются в экспериментальной проверке.

При электроснабжении установок индукционного нагрева нагрузка уже будет иметь индуктивно-активный характер при $\cos\varphi < 1$ [1,2,4], что может, как показано в гл. 3, заметным образом повлиять на рабочие показатели и характеристики системы электроснабжения.

В целях определения возможности применения высоковольтного электротехнического комплекса повышенной частоты для электропитания

установок индукционного нагрева (например, железобетонных изделий) и предварительной оценки показателей такого устройства были выполнены эксперименты с использованием лабораторной установки, подробно описанной в разд. 4.2. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.17.

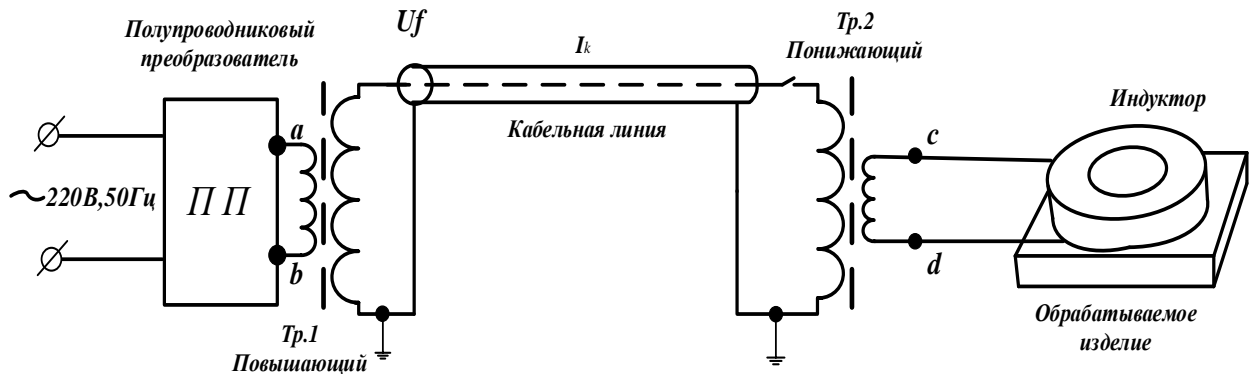


Рис. 4.17. Структурная схема экспериментальной установки

Электропитание устройства осуществляется от сети переменного тока 220/380 В, 50 Гц. Напряжение промышленной частоты с помощью полупроводникового преобразователя напряжения ПП превращается в несинусоидальное напряжение повышенной частоты $f = 10 \div 20$ кГц. Это напряжение с помощью повышающего трансформатора Тр1 увеличивается до значения 1,25 кВ на выводах вторичной обмотки и подается на высоковольтную кабельную линию, длина l_k которой, как показывают предварительные оценки, не будет превышать $80 \div 120$ м, а в эксперименте составляла $l_k \approx 40$ м. В конце кабельной линии включен понижающий трансформатор Тр2, к выводам вторичной обмотки которого подключен индуктор в виде плоской катушки, расположенной на стальной (греющей) поверхности.

На рис. 4.18 электрическая схема силовой части установки, на которой отражена конструкция полупроводникового преобразователя ПП (рис. 4.17).

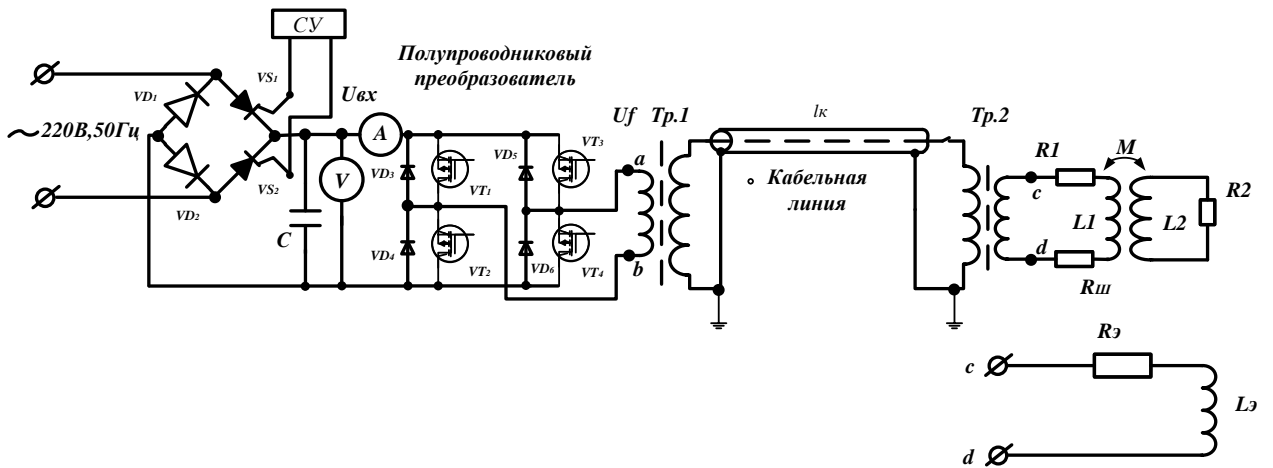


Рис. 4.18. Силовая электрическая схема установки и эквивалентная схема индуктора

Он включает в себя управляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме и состоящий из двух диодов и двух тиристоров, управляемых с помощью схемы управления CV , а также конденсатора C для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Постоянное напряжение на выходе выпрямителя регулируется в пределах $U_{ex} = 0 \div 250V$. Это напряжение подано на вход транзисторного преобразователя, собранного по мостовой схеме из четырех силовых IGBT транзисторов $VT_1 \div VT_4$, который преобразует входное постоянное напряжение в напряжение повышенной частоты U_f , амплитуда которого приблизительно равна величине постоянного напряжения U_{ex} . Напряжение U_f через $Tr.1$, $Tr.2$ и высоковольтный кабель подводится к индуктору, который представлен двумя взаимосвязанными с коэффициентом M индуктивностями L_1 и L_2 . R_1 и $R_2 \gg R_1$ представляют собой активные сопротивление обмотки индуктора и обрабатываемого изделия (стальной поверхности), и именно в сопротивлении R_2 возникают потери электроэнергии от токов, наведенных электромагнитным полем индуктора в обрабатываемом изделии, которые приводят к нагреву этого изделия. Последовательно с индуктором включен безиндуктивный шунт $R_{ш}$ для осциллографирования электрического тока, протекающего в индукторе.

Однако для анализа процессов в такой установке нагрузку (индуктор с обрабатываемым изделием), как показано в разд. 3.5, удобно представить в

виде цепочки, состоящей из эквивалентной индуктивности $L_{\text{Э}}$ и эквивалентного активного сопротивления $R_{\text{Э}}$ (рис. 4.18), значения которых можно определить экспериментальным методом, описанным в [113]. В этом случае полное сопротивление нагрузки в комплексной форме описывается соотношением

$$Z_n = R_{\text{Э}} + j\omega L_{\text{Э}}. \quad (4.3)$$

где $\omega = 2\pi f$ - частота рабочего напряжения.

В ходе экспериментов изменялась величина напряжения $U_{\text{вх}}$ (измеряется вольтметром V) от 50 В до 250В с шагом 50В. При каждом значении $U_{\text{вх}}$ измерялась величина тока $I_{\text{вх}}$ на входе преобразователя с помощью амперметра A (рис. 4.18), а также проводилось осциллографирование напряжений в начале U_1 и в конце U_2 кабельной линии, напряжения на зажимах индуктора U_{II} и на шунте $R_{ш}$. Из осциллограмм напряжения определялось амплитудное значение этих напряжений.

Для сравнительных оценок были выполнены аналогичные эксперименты для случая, когда индуктор (т. c и d – рис. 4.18) был подключен через понижающий трансформатор непосредственно к выходным зажимам преобразователя (т. a и b – рис. 4.18).

Во всех случаях определялась электрическая мощность на входе преобразователя с использованием соотношения

$$P_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}. \quad (4.4)$$

На рис. 4.19 представлены характерные осциллограммы ЭДС транзисторного преобразователя напряжения (т.е. между точками a и b – рис. 4.17 и 4.18 при отключении первичной обмотки Tr_1), высокого напряжения в начале и в конце кабельной линии. Из рис. 4.19 нетрудно сделать вывод, что при работе рассматриваемой установки (рис. 4.1) форма осциллограмм высокого напряжения заметно отличаются от формы

осциллограммы ЭДС прежде всего наличием высокочастотных составляющих заметно большей величины, чем при активной нагрузке (разд. 3.4), что означает наличие коммутационных перенапряжений при установившемся режиме работы установки [26]. Причем амплитуда перенапряжений в начале кабельной линии U_1 (рис. 4.19,б) существенно выше, чем в конце U_2 (рис. 4.19,б). Необходимо всестороннее исследование таких перенапряжений в дальнейшем, т.к. знание их характеристик необходимо для обоснованного выбора изоляции и величины рабочего напряжения высоковольтной кабельной линии.

На рис. 4.20 представлены характерные осциллограммы напряжения U_{II} на зажимах индуктора, т.е. между точками c и d (рис. 4.17, 4.18), и осциллограммы напряжения на шунте $R_{ш}$, т.е. тока в индукторе, для случая электропитания индуктора через электропередачу и непосредственно с выхода преобразователя.

Анализ этих осциллограмм (рис. 4.20) позволяют сделать вывод, что при питании индуктора через высоковольтную электропередачу в кривой напряжения на индукторе и тока присутствуют высокочастотные составляющие, затухающие во времени, как и в осциллограммах высокого напряжения на кабельной линии (рис. 4.19). При питании индуктора непосредственно от преобразователя напряжения высокочастотные составляющие выражены в меньшей степени, а их частота значительно выше (рис. 4.20). Форма осциллограммы тока в индукторе имеет приблизительно пилообразный вид и существенно отличается от формы осциллограммы напряжения, воздействующего на индуктор (рис. 4.20). Такую особенность изменения тока во времени можно объяснить индуктивным характером нагрузки [32,81,114]. Весьма интересным результатом является то, что амплитуда напряжения (установившееся значение) на индукторе и тока в нем в обоих случаях имеют практически одинаковое значение, т.е. наличие между преобразователем напряжения и потребителем электроэнергии

(индуктором) высоковольтной электропередачи практически не сказывается на величине этих параметров.

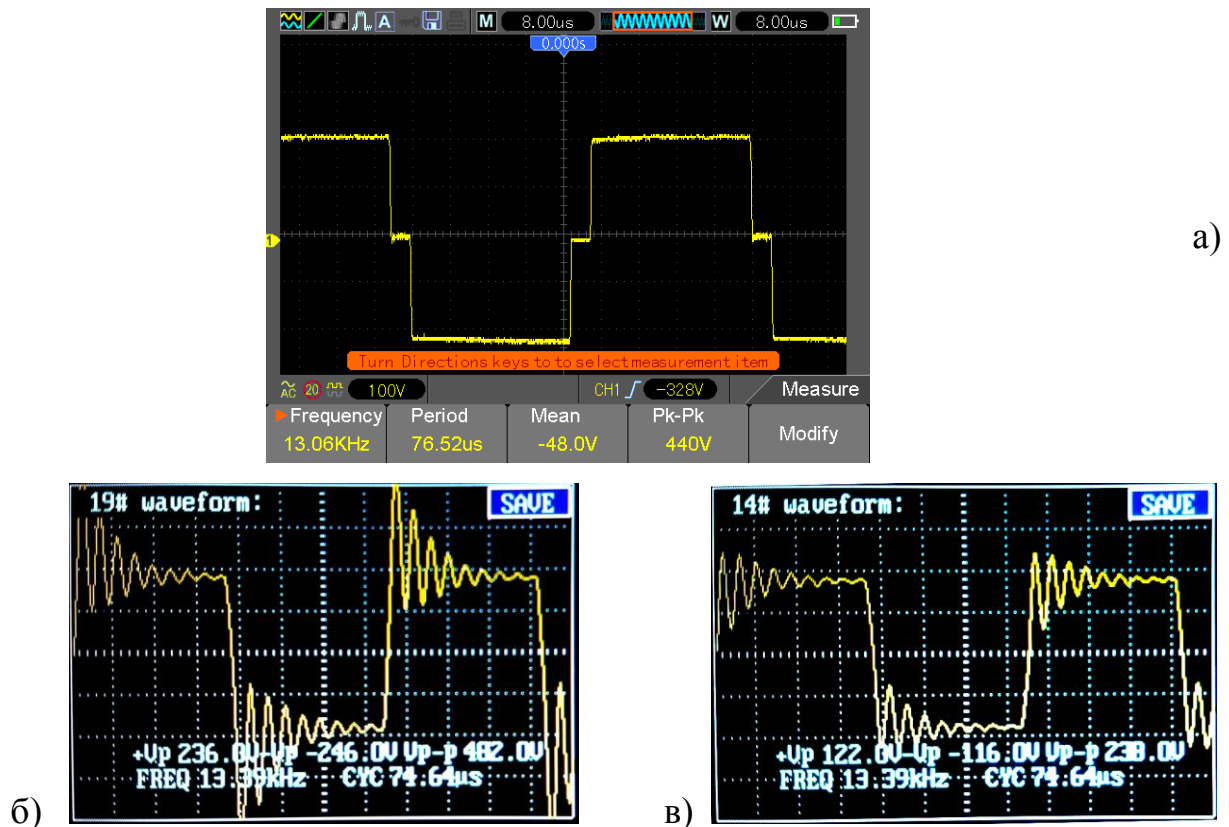
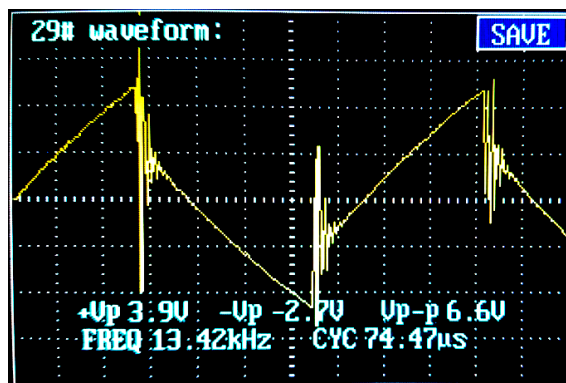
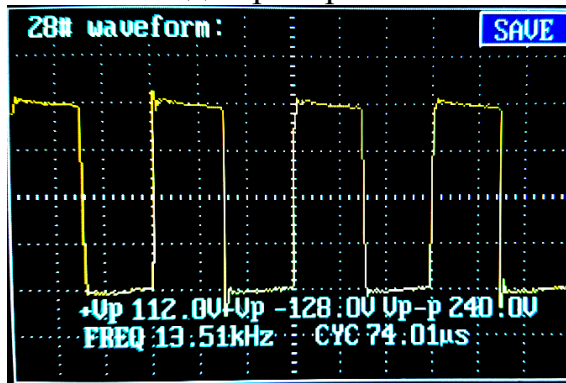


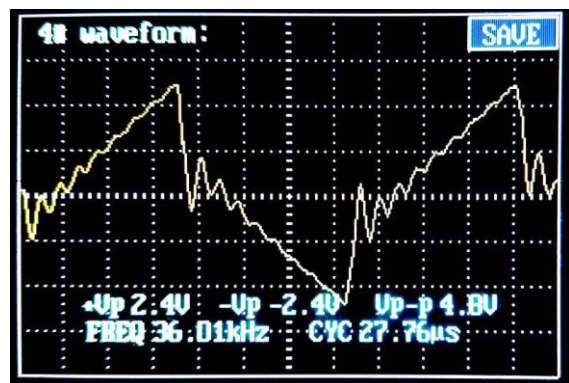
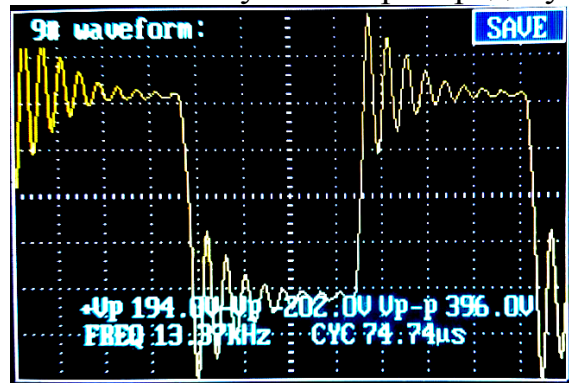
Рис. 4.19. Характерные осциллограммы ЭДС (а) преобразователя напряжения ($U_{ex} = 220$ В), а также высокого напряжения U_I в начале (б) и в конце (в) кабельной линии ($U_{ex} = 200$ В); высокое напряжение осциллографировалось с помощью делителя напряжения 1:10, т.е. цена больших делений по вертикали составляет 500 В/дел

Основным показателем электроснабжения различных потребителей электроэнергии является значение активной мощности, передаваемой в нагрузку [1,2,4,34]. Однако измерение этого параметра в рассматриваемом случае представляет собой сложную задачу, т.к. приборы для измерения токов и напряжений, изменяющихся во времени по весьма сложному закону (рис. 4.19, 4.20), в настоящее время практически отсутствуют. В дальнейших исследованиях целесообразно воспользоваться калориметрическим методом, который успешно использован при исследовании показателей энергетической эффективности подобных установок с чисто активной нагрузкой (рис. 4.13) [86].

Питание индуктора непосредственно
с выхода преобразователя



Питание индуктора через
высоковольтную электропередачу



а)

б)

Рис. 4.20. Характерные осциллограммы напряжения на индукторе U_{II} (а) и напряжения на шунте (б) $R_{ш} = 0,809$ Ом (т.е. осциллограммы тока в индукторе – цена больших делений составляет 1,24 А/дел.) при $U_{ex} = 200$ В

Тем не менее, для косвенной оценки влияния высоковольтной электропередачи на процесс передачи активной мощности, по-видимому, можно воспользоваться значением мощности, передаваемой в преобразователь напряжения P_{ex} в звене постоянного тока (рис. 4.17, 4.18) и определяемой выражением (4.2). Следует предположить, что если условия передачи активной мощности при наличии и при отсутствии высоковольтной электропередачи будут существенно отличаться, то это обязательно скажется на величине этого показателя.

На рис. 4.21 представлена зависимость мощности, передаваемой в преобразователь, напряжения P_{ex} , от величины напряжения (установившегося значения) на зажимах индуктора $U_{н}$, т.е. между точками c и d (рис. 4.17, 4.18).

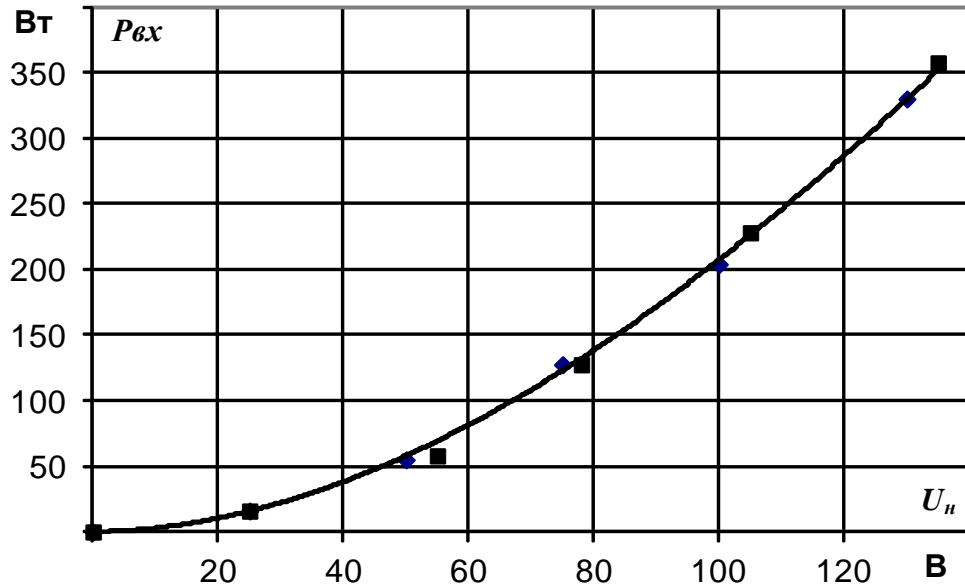


Рис. 4.21. Зависимость мощности, передаваемой в преобразователь напряжения, от величины напряжения на входе преобразователя при питании индуктора через высоковольтную кабельную линию (■) и при включении индуктора непосредственно на выход преобразователя (◆)

Практически полное совпадение значений P_{ex} при двух рассматриваемых вариантах (рис. 4.21) позволяет сделать предварительное заключение об отсутствии заметного влияния способа электропитания индуктора на величину мощности, передаваемой в нагрузку, и показатели энергетической эффективности такого процесса.

Выполненные эксперименты позволили также, используя методику, приведенную в [113], определить численные значения эквивалентных параметров индуктора (рис. 4.18):

$$L_{\text{Э}} = 0,55 \text{ мГн}; R_{\text{Э}} = 19,4 \text{ Ом}. \quad (4.5)$$

Это означает, что при частоте рабочего напряжения $f = 13,4 \text{ кГц}$ (рис. 4.19, 4.20) полное сопротивление нагрузки (4.3), его модуль и коэффициент мощности имеют следующие численные значения:

$$Z = 19,4 + j46,3; |Z| = 50,2 \text{ Ом}; \cos\varphi = 0,39. \quad (4.6)$$

Полученные результаты (4.6) подтверждают ярко выраженный индуктивный характер нагрузки в виде индуктора, выполненного в форме

плоской катушки, установленной на стальной греющей поверхности. Эти численные значения можно использовать, в дальнейшем, для исследования установившихся режимов работы установки (рис. 4.17) с помощью ранее предложенной расчетной методики, получившей развитие и усовершенствование в настоящей работе [27,28,83,86,87].

Для более тщательной опытной проверки методики расчета (разд. 2.2, 2.3) системы электроснабжения повышенной частоты с индуктивной активной нагрузкой при определении показателей энергетической эффективности был выполнен эксперимент, схема которого представлена рис. 4.22

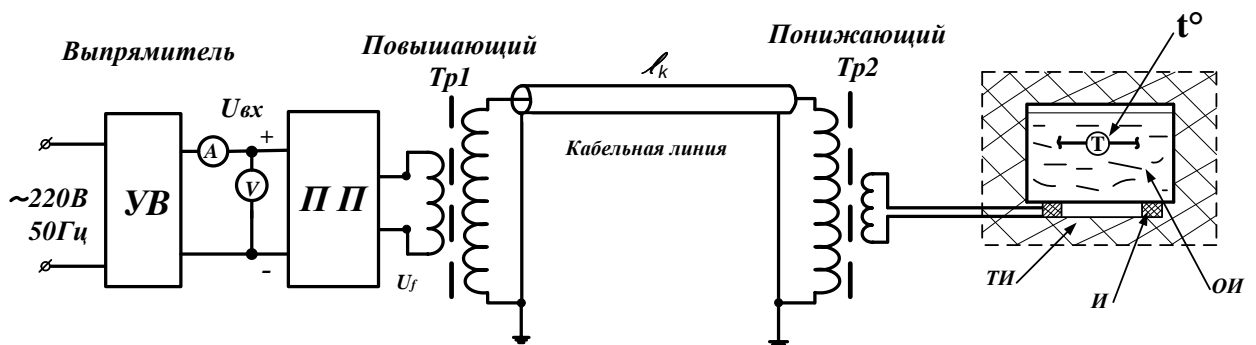


Рис.4.22. Схема экспериментальной установки для определения её КПД при индуктивно-активной нагрузке

Согласно рис. 4.22, в этом случае для определения КПД используется калориметрический метод, как и в опытах с активной нагрузкой (рис. 4.13). отличия заключаются в том, что в установке рис. 4.22 емкость с водой выполнена из стали, а нагрев осуществляется не с помощью электрических водонагревателей, а с помощью индуктора, установленного под дном емкости.

Для сравнения в экспериментах были использованы два типа кабеля : коаксиальный и двухпроводный в общем немагнитном экране. Кроме этого, был выполнен еще один эксперимент, когда напряжение подводилось от полупроводникового преобразователя через понижающей трансформатор непосредственно на индуктор, т.е. была удалена высоковольтная

электропередача на пути от источника питания к потребителю на рис. 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 представлены экспериментальные и расчетные осциллограммы напряжений и тока в цепи индуктора при приблизительно одинаковой величине передаваемой активной мощности.

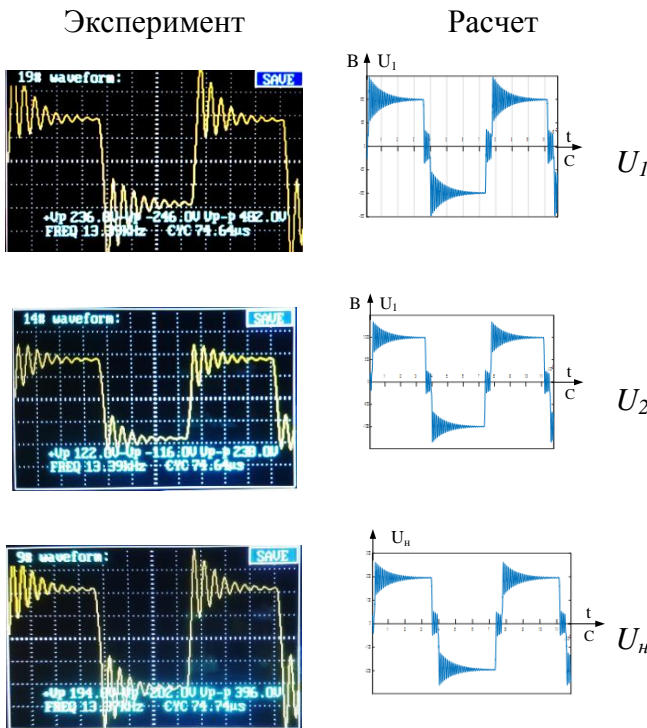


Рис. 4.23. Осциллограммы напряжения при использовании коаксиального кабеля РК-75: измерение U_1 и U_2 через делитель 1:10

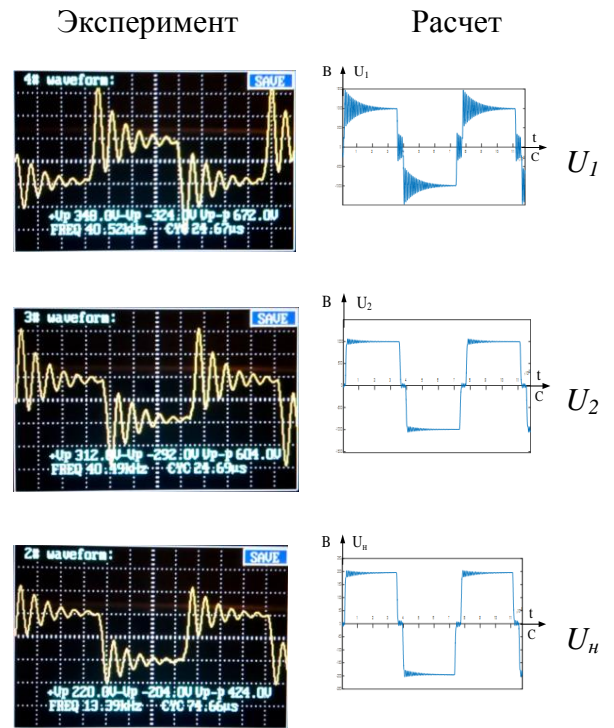


Рис. 4.24. Осциллограммы напряжения при использовании двухпроводного кабеля: измерение U_1 и U_2 через делитель 1:20

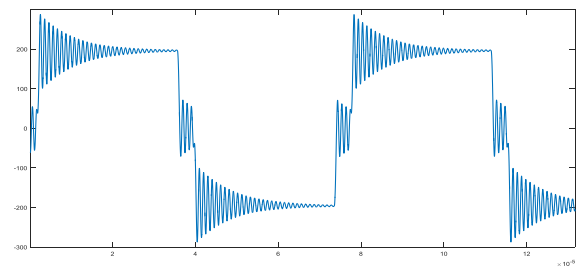
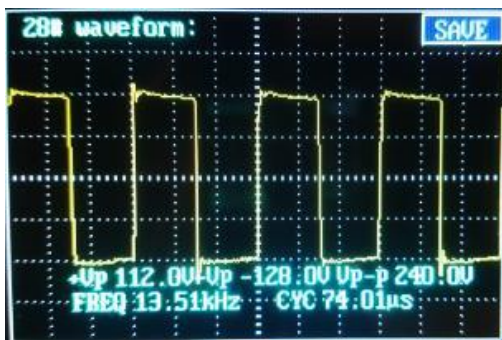
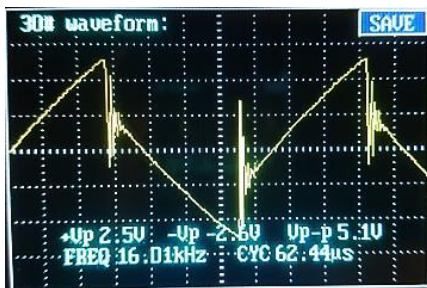
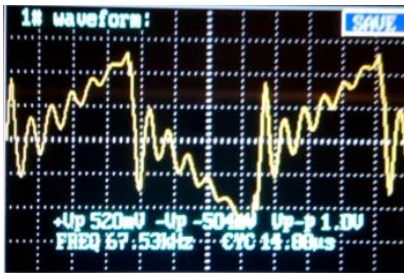
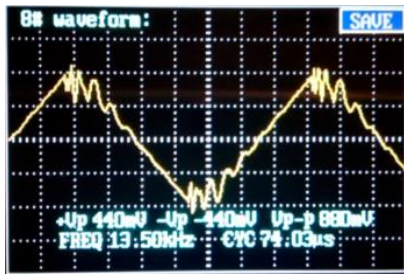
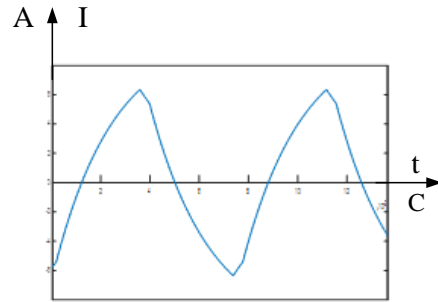


Рис. 4.25. Осциллограммы напряжения на индукторе U_n (без линии): цена деления опытных осциллограмм 100 В/дел; $U_{вх} = 200$ В

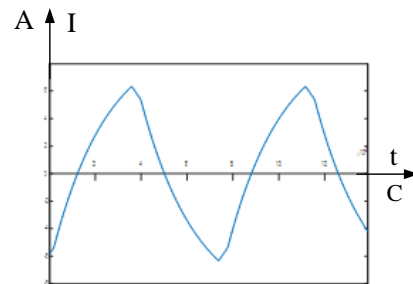
Эксперимент



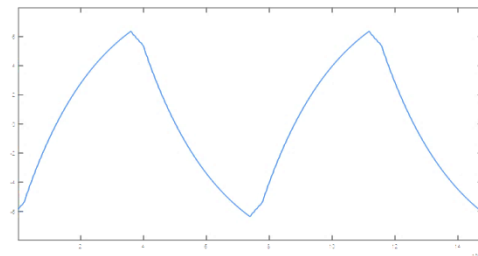
Расчет



а)



б)



в)

Рис. 4.26. Осциллограммы тока в нагрузке (индукторе): а – коаксиальный кабель РК-75, 40 м; б – двухпроводный кабель, 40,6 м; в – без электропередачи; условия измерения согласно рис. 4.20; цена делений опытных осциллограмм 1,24 А/дел; $U_{ex} = 200$ В

Полученные результаты свидетельствуют, с одной стороны, о хорошем согласовании результатов расчета и эксперимента, с другой, об увеличении высокочастотной составляющей в кривой напряжений и токов по сравнению со случаем, когда нагрузка имеет активный характер. Отмеченное обстоятельство требует поиска решения, в дальнейшем, по уменьшению величины этих составляющих, т.к. их наличие влечет за собой неприятные последствия: увеличение перенапряжений на изоляции высоковольтных трансформаторов и кабельной линии, увеличение потерь энергии.

В результате выполненных опытов определены значения КПД установки для указанных выше условий, которые представлены на рис. 4.27. Сведения,

представленные на этом рисунке, подтверждает тот факт, что наличие электропередачи не приводит к осязательному увеличению потерь энергии в установке, о чем свидетельствует рис. 4.21. С другой стороны сравнительно невысокие значения КПД установки (рис. 4.27) объясняются тем, что она работала при величине передаваемой мощности, составляющей около 5% номинальной, соответствующей нерациональному режиму её работы, при котором значительно ухудшается соотношение между полезной передаваемой активной мощностью и постоянной составляющей потерь энергии в магнитопроводе силовых трансформаторов повышенной частоты [86,102].

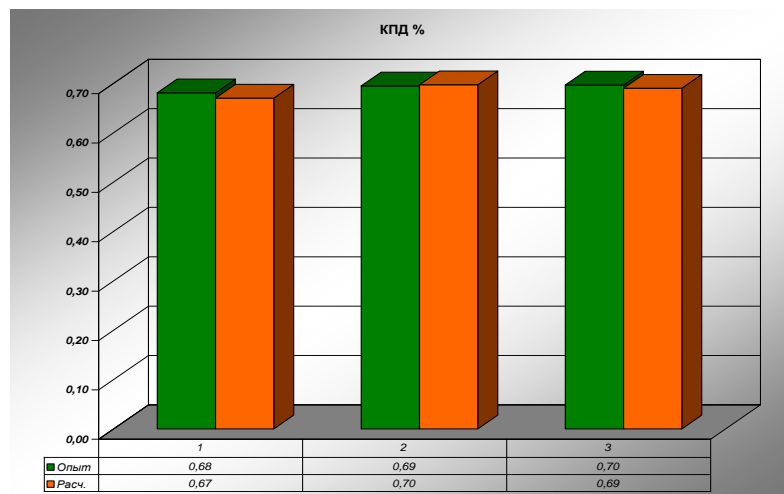


Рис. 4.27. Сравнение значений КПД

Хорошее согласование результатов расчета и эксперимента (рис. 4.27) является дополнительным подтверждением достоверности предложенной расчетной методики (разд. 2.2, 2.3).

4.5. Оценка параметров и характеристик магистральной системы электроснабжения промышленного назначения

Положительные результаты экспериментальной проверки предложенных расчетных методик (гл. 2) являются основанием для их

использования в целях разработки и исследования характеристик систем электроснабжения повышенной частоты, выполненных на основе ЭТКПЧ и пригодных для использования на практике в реальных производственных условиях.

На основе анализа условий возможного применения подобных установок на предприятиях строительной отрасли для электроснабжения технологических устройств электротепловой обработки железобетонных изделий предложены два перспективных варианта реализации систем электроснабжения повышенной частоты, которые схематично отображены на рис. 4.28 и рис. 4.29.

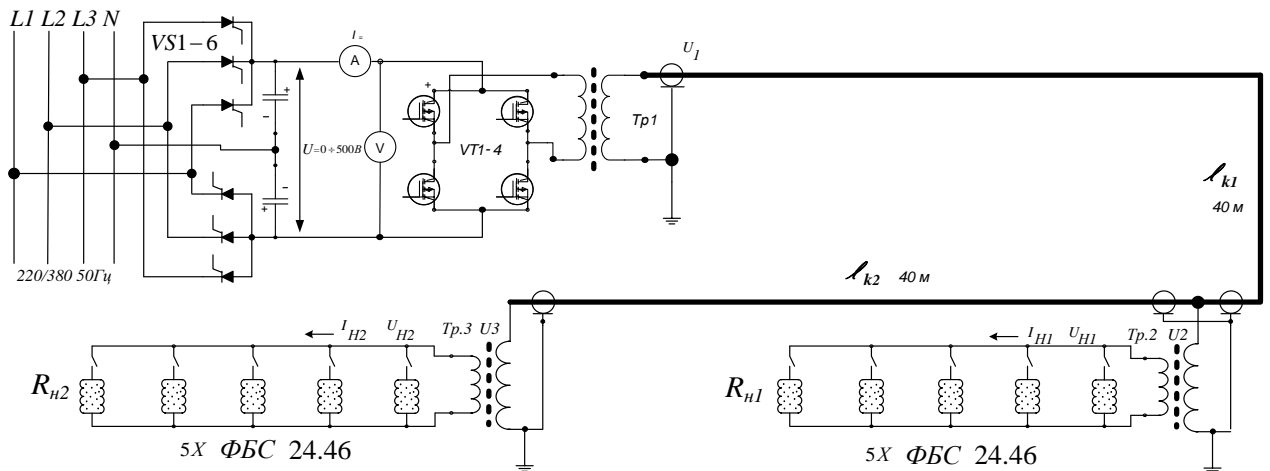


Рис. 4.28. Схема ЭТКПЧ в виде системы промышленного электроснабжения магистрального типа установок для изготовления железобетонных изделий (фундаментных блоков)

В одной случае (рис.4.28) такая система обеспечивает электроснабжение двух участков по изготовлению фундаментных железобетонных блоков типа ФБС 24.4.6. Такие изделия широко применяются на практике [115÷119]. Это устройство (рис. 4.28) с не меньшим успехом может быть использовано для электропитания электротехнологических установок, предназначенных для изготовления с помощью электротепловой обработки токами повышенной частоты широкого набора распространенных железобетонных изделий: перемычки оконных и дверных проемов, колодезные кольца, бордюрный

камень, тротуарная плитка, блоки ячеистого бетона и др. [115÷120]. Перечисленные изделия входят в номенклатуру изделий малых предприятий, для которых рассматриваемая установка (рис. 4.28) будет вполне выгодна, доступна и удобна в применении [7,120÷123].

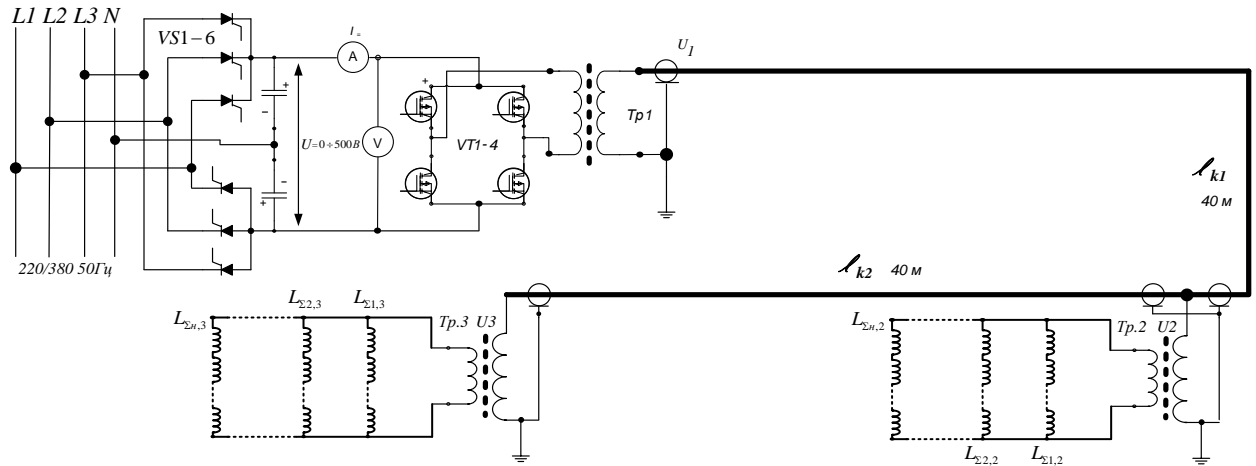


Рис. 4.29. Схема ЭТКПЧ в виде системы промышленного электроснабжения магистрального типа установок для изготовления железобетонных элементов шахт дымоудаления с помощью индукционного нагрева

Во втором (рис.4.29), такая система служит для электропитания двух устройств, предназначенных для изготовления железобетонных элементов шахт дымоудаления, в которых электротепловая обработка выполняется с помощью индукционного нагрева [113].

Количество объектов обработки, одновременно находящихся в работе с по каждому варианту (рис. 4.28 и 4.29) определяются параметрами технологического процесса изготовления рассматриваемых изделий [7,116]: длительность стадии нагревания и изотермической стадии, изготовление и укладка бетона и др.

Как показали расчетные оценки [7,116], максимальная мощность, передаваемая в объект в первом случае (рис. 4.28) при его электротепловой обработке составляет

$$P = 3 \text{ кВт.} \quad (4.7)$$

Это означает, что номинальная мощность в каждой точке присоединения нагрузки (рис. 4.28) составит

$$P_{ном1} = P_{ном2} = 15 \text{ кВт.} \quad (4.8)$$

Учитывая, что максимальное значение напряжения

$$U_{ex} = 500 \text{ В} \quad (4.9)$$

(рис. 4.28), максимальное значение тока, протекающего через транзисторы преобразователя VT1–VT4 (рис. 4.28) будет иметь величину [16,38]

$$I_{Tmax} = \frac{P_{ном1} + P_{ном2}}{U_{ex} \cdot \eta_T} \cong 63 \text{ А,} \quad (4.10)$$

где $\eta_T = 0,95$ - расчетное значение КПД транзистора [16,38].

Анализ характеристик существующих IGBT компонентов позволил сделать вывод о том, что полученным значениям U_{ex} и I_{Tmax} с учетом существующей методик выбора таких элементов [35,38] соответствует IGBT модуль типа CM300DI-24NFH 2IGBT 1200 (300A 50KHz NFH-series) (рис. 4.30). Основные параметры модуля приведены в табл. 4.2, а в его состав входят два последовательно соединенных IGBT транзистора (рис. 4.30.б), т.е. в конструкции транзисторного преобразователя (рис. 4.28) используется два таких модуля.

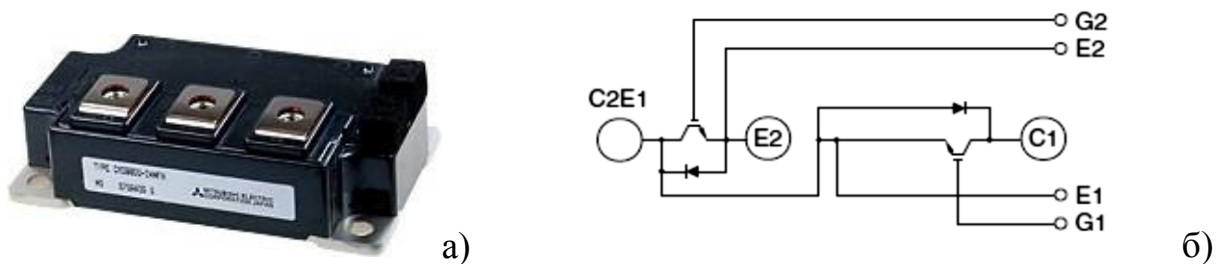


Рис. 4.30. Внешний вид и электрическая схема соединений IGBT модуля типа CM300DU-24NFH 2IGBT 1200 (300A 50KHz NFH-series)

Представленные параметры: (4.8) ÷ (4.10) и табл. 4.2, использовались, как исходные сведения для проведения расчетов с помощью предложенной методики (разд. 2.2,2.3).

Параметры IGBT модуля CM300 DU -24NFH 2IGBT 1200

Таблица 4.2

Наименование	Значение	Ед.изм.
Габариты модуля	108 x 62 x 29	мм
Масса	400	Г
Максимальное напряжение коллектор-эмиттер	1200	В
Длительный максимальный ток коллектора	300	А
Падение напряжение на транзисторе в открытом состоянии при $I_k=300A$	5	В
Максимальная рассеиваемая мощность	1130	Вт
Стоимость	4000 - 4500	Руб.

Параметры схемы замещения (рис. 2.4) определяются с использованием предложенных методик [16], гл. 2.

В результате, вычислений, выполненных с помощью этих методик (разд. 2.2, 2.3), получены зависимости активной мощности, передаваемой в нагрузку от количества подключенных объектов обработки $n_{об}$ в различных сочетаниях, приведенные на рис. 4.28. На рис. 4.32 представлены зависимости КПД системы электроснабжения (ЭТКПЧ) для вариантов включения нагрузки, соответствующих рис. 4.28.

Полученные результаты (рис. 4.31 и 4.32) свидетельствуют о практически линейном влиянии количества потребителей электроэнергии на величину потребляемой активной мощности.

Нельзя не отметить, что КПД ЭТКПЧ (рис. 4.32) слабо зависит от величины передаваемой активной мощности при ее изменении в широких пределах и имеет значение не ниже 98 %. Можно сделать вывод о высокой энергетической эффективности такой системы электроснабжения (рис. 4.28) при любой нагрузке.

На рис. 4.33 представлены расчетные зависимости значений высокого напряжения в различных точках кабельной линии, а также напряжения на нагрузке от числа подключенных потребителей электроэнергии. Анализ этих результатов дает основание сделать вывод, что при пятикратном изменении нагрузки колебание рабочего напряжения, как на высоковольтной кабельной линии, так и у электроприемника не превышает 0,9 % и находится в допустимых пределах [3,34].

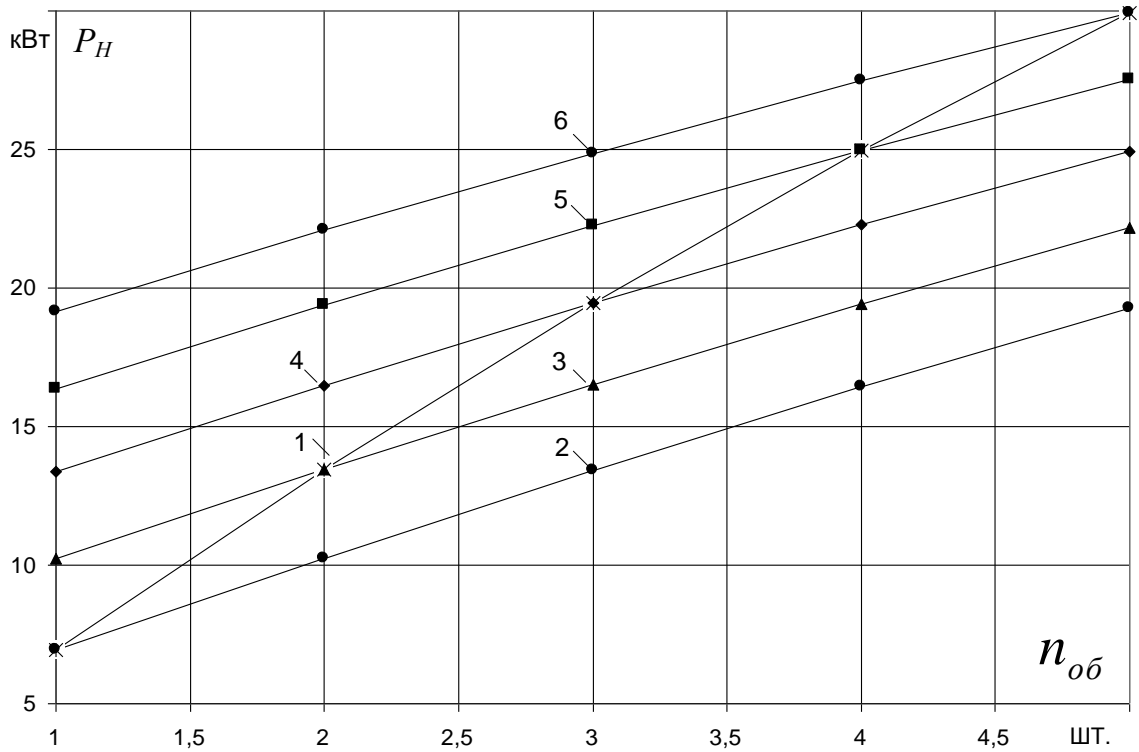


Рис. 4.31. Величина активной мощности, передаваемой в нагрузку, в зависимости от числа потребителей энергии (обрабатываемых блоков): 1 – в каждой точке число подключенных объектов одинаково; 2 – $n_{об1} = 1$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 3 – $n_{об1} = 2$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 4 – $n_{об1} = 3$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 5 – $n_{об1} = 4$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 6 – $n_{об1} = 5$, $n_{об2} = 1 \div 5$

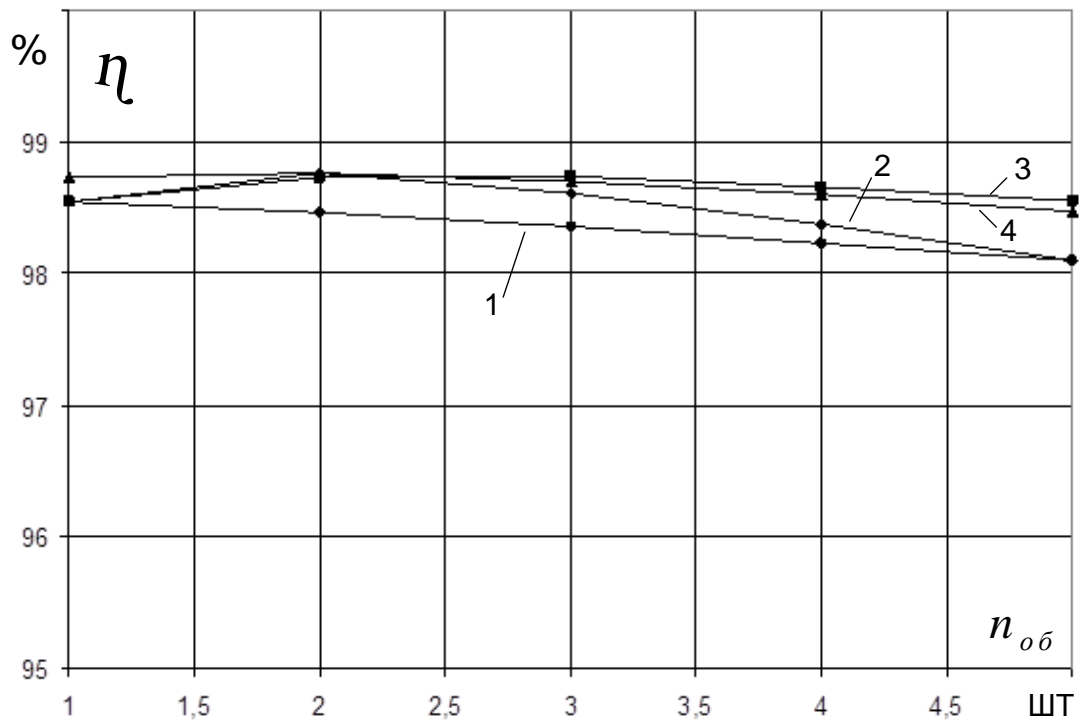
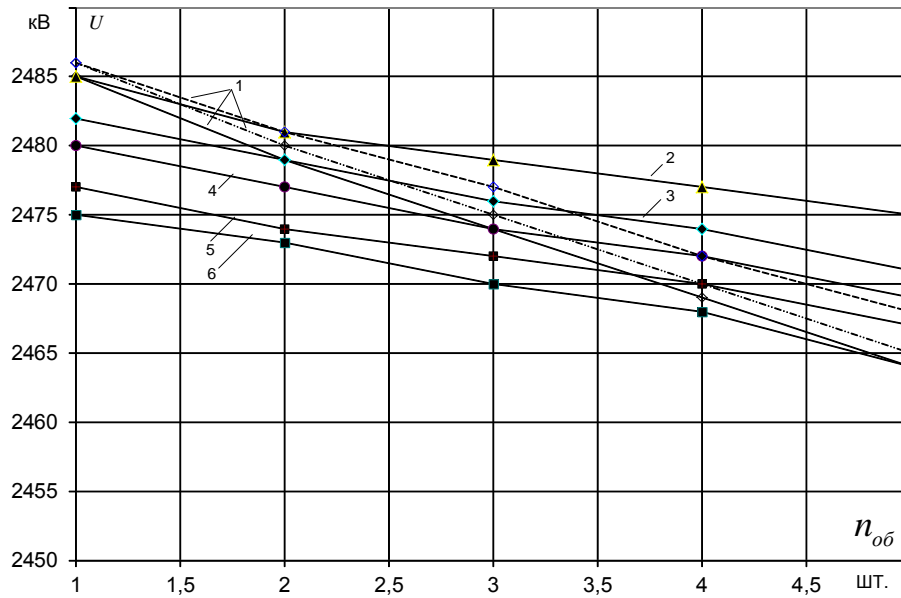
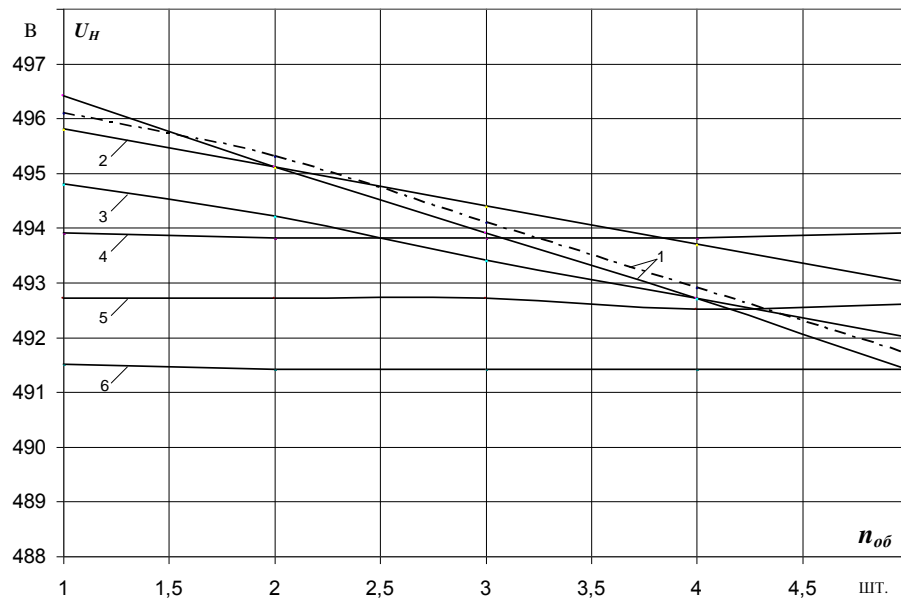


Рис. 4.32. Значения КПД системы электроснабжения в зависимости от числа подключенных объектов: обозначения на поле рисунка соответствуют рис. 4.31



а)



б)

Рис. 4.33. Зависимости величины высокого напряжения (а) и напряжения на нагрузке (б) магистральной линии электроснабжения повышенной частоты от числа потребителей электроэнергии: 1 – в каждой точке число подключенных объектов одинаково; 2 – $n_{об1} = 1$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 3 – $n_{об1} = 2$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 4 – $n_{об1} = 3$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 5 – $n_{об1} = 4$, $n_{об2} = 1 \div 5$; 6 – $n_{об1} = 5$, $n_{об2} = 1 \div 5$; пунктирная линия – напряжение в начале кабельной линии; штрих-пунктирная линия – напряжение в точке отбора мощности; сплошные линии – напряжение в конце кабельной линии

На рис. 4.34 показаны по аналогии с рис. 4.31÷4.33 зависимости величины (амплитуды) электрического тока в различных точках высоковольтной кабельной линии от числа одновременно подключенных объектов (рис. 4.28).

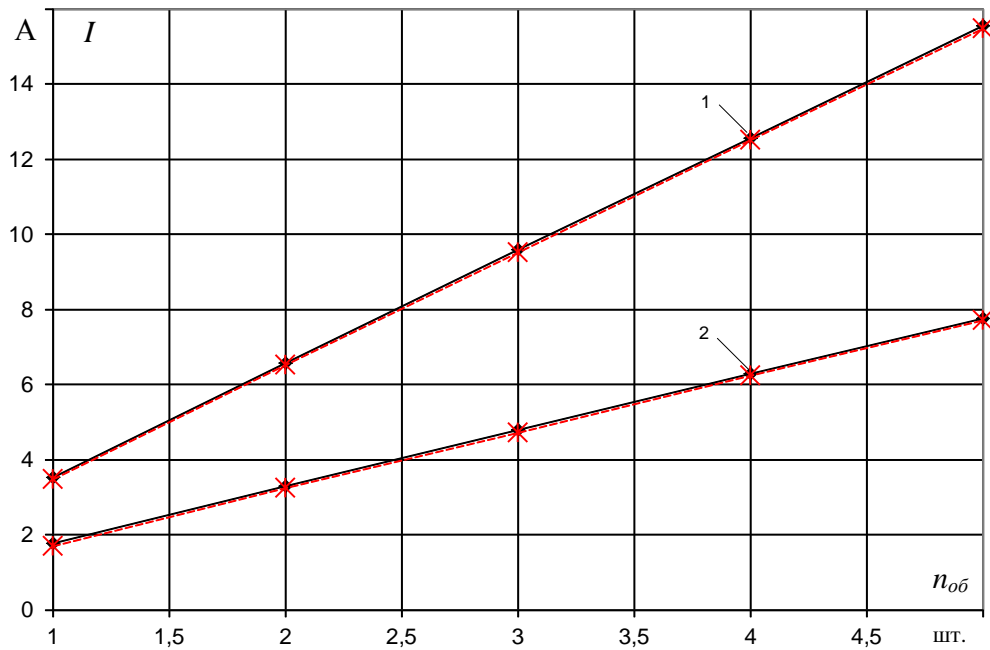


Рис. 4.34. Зависимость амплитуды электрического тока повышенной частоты в начале и в конце участков магистральной кабельной линии от числа потребителей электроэнергии $n_{об1} = n_{об2} = 1 \div 5$: 1 – ток в первом участке; 2 – ток во втором участке; сплошные линии – значения тока в конце участка; пунктирные линии – значения тока в начале участка

Анализ рис. 4.31÷4.34 позволяет сделать вывод, что наблюдается линейная зависимость активной мощности, передаваемой в нагрузку и тока в кабельной линии от числа потребителей электроэнергии. Как весьма положительный факт, можно отметить, что благодаря существенно большему значению активной мощности по сравнению с лабораторной установкой (разд. 4.3) многократно снижается различие в величине электрического тока в начале и в конце каждого участка кабельной линии. Другими словами, в этом случае значительно ослабевает отрицательная роль реактивной мощности и открывается возможность передачи на повышенных частотах больших значений активной мощности на существенно большие расстояния, чем в рассматриваемых выше установках (разд. 4.3).

Другим положительным результатом является то, что при глубоком (на порядок) изменении передаваемой активной мощности КПД ЭТКПЧ колеблется в небольшом диапазоне, оставаясь на достаточно высоком уровне: не ниже 98 %.

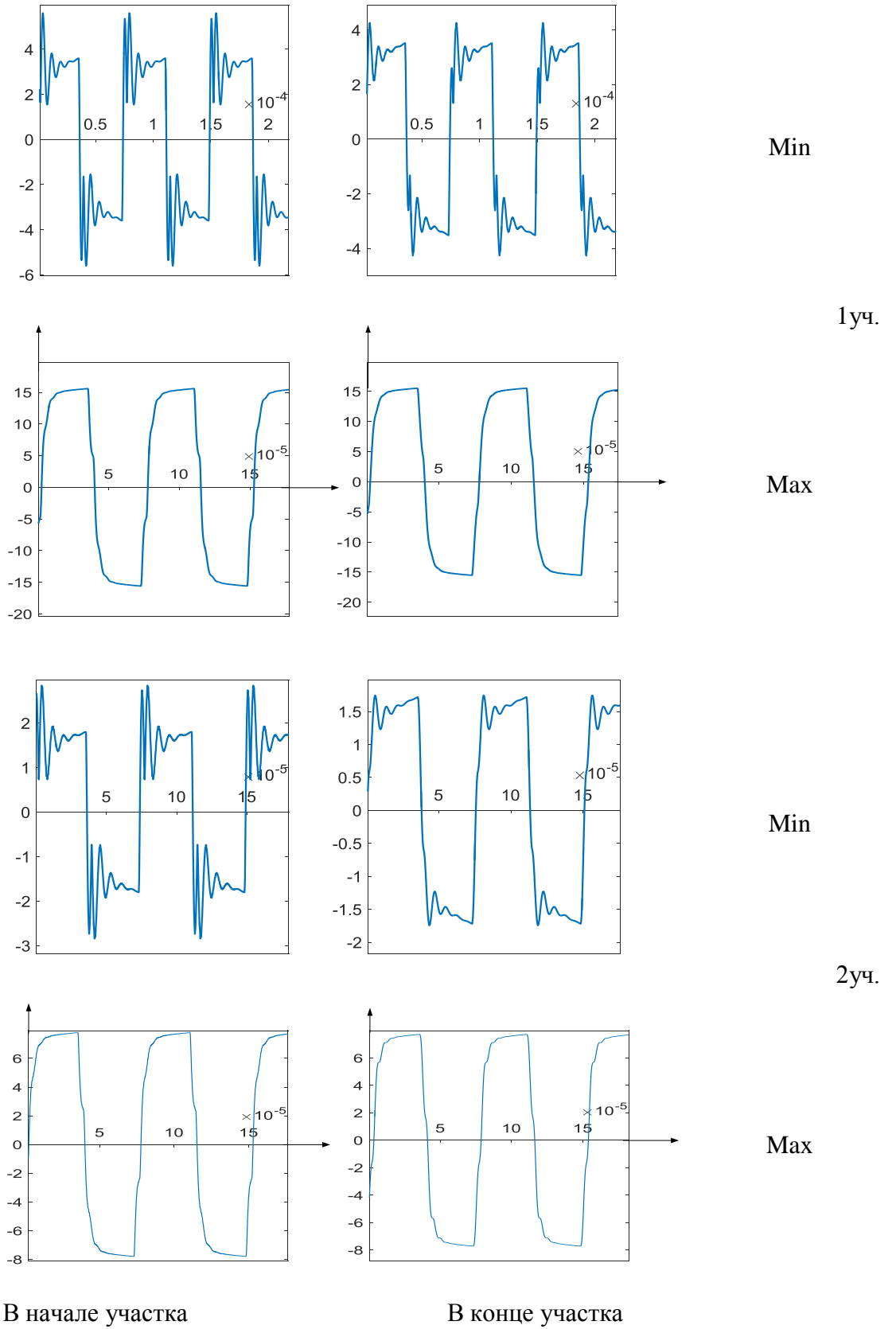


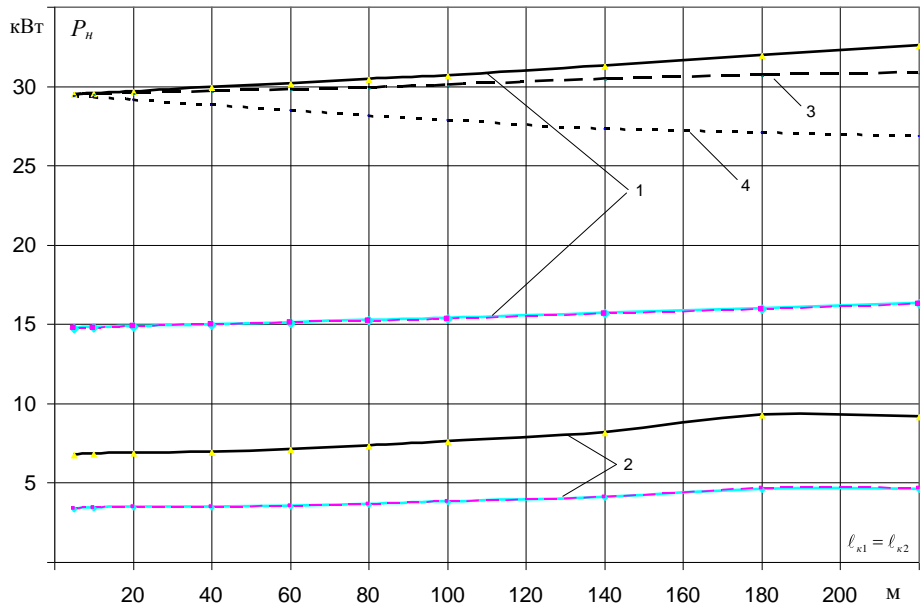
Рис. 4.36. Расчетные осциллограммы токов, А, в различных точках системы электроснабжения (рис. 4.28)

Как показывает анализ производственных условий возможного применения предлагаемой магистральной системы электроснабжения (рис. 4.28), длина участков кабельной линии $\ell_{к1}$ и $\ell_{к2}$, может колебаться в пределах 20÷130 м. Поэтому также были выполнены расчеты потребляемой активной мощности и КПД (η) системы от длины участков кабельной линии. Результаты этих вычислений для разных типов применяемых кабелей (коаксиальный и двухпроводный в экране) приведены на рис. 4.37.

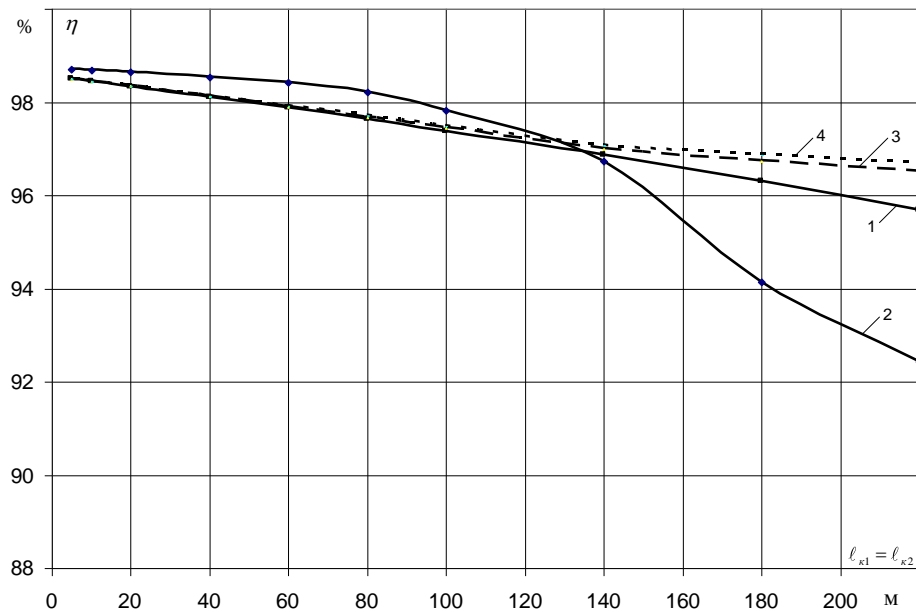
Из анализа полученных зависимостей можно заключить, что как P_n , так и η слабо зависят от длины кабельной линии в указанных выше пределах и этот фактор не имеет большого практического значения. Характерно, что с увеличением $\ell_{к1}$ и $\ell_{к2}$ может наблюдаться слабое увеличение P , которое можно объяснить влиянием емкостного эффекта, и некоторое снижение η , вызванное увеличением потерь энергии в кабельной линии. Причем, 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. Характерно, что мощность, передаваемая в нагрузку, как в конце линии, так и в точке отбора (промежуточной) имеет практически одинаковую величину независимо от длины кабельной линии [124].

Второй вариант магистральной системы электроснабжения (рис. 4.29) не предусматривает возможности изменения нагрузки, как в промежуточной точке, так и в конечной. В этом случае возможны только три варианта работы системы: нагрузка подключена в обеих точках, нагрузка подключена только в конце линии и нагрузка включена только в промежуточной точке.

При оценке параметров индуктивно-активной нагрузки за основу можно принять характеристики индуктора, использованного в предыдущих исследованиях (разд. 3.5).



а)



б)

Рис. 4.37. Зависимости активной мощности $P_n = P_{n1} + P_{n2}$, передаваемой в нагрузку (а) и КПД ЭТКПЧ (б) 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); сплошные черные линии – P_n (а) и КПД (б); сплошная зеленая линия – P_{n2} (мощность в нагрузке в конце линии); пунктирная красная – P_{n1} (мощность в точке отбора); 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, $C_0=10$ пФ/м)

Второй вариант магистральной системы электроснабжения (рис. 4.29) не предусматривает возможности изменения нагрузки, как в промежуточной точке, так и в конечной. В этом случае возможны только три варианта работы системы: нагрузка подключена в обеих точках, нагрузка подключена только в конце линии и нагрузка включена только в промежуточной точке.

При оценке параметров индуктивно-активной нагрузки за основу можно принять характеристики индуктора, использованного в предыдущих исследованиях (разд. 3.5). Предварительные оценки показали, что для электротепловой обработки рассматриваемого железобетонного изделия в металлической опалубке (элемент дымоудаления типа ШДЦ 12) требуется мощность порядка $P_{обр} = 9 \div 12$ кВт [107] учитывая, что индуктор, использованный в опыте имеет мощность порядка $P_{ином} = 300 \div 340$ Вт, потребуется таких индукторов в следующем количестве:

$$n_u = \frac{P_{обр}}{P_{ином}} = 28 \div 38 \text{ шт.} \quad (4.11)$$

Эти индукторы в целях равномерного подогрева изделия должны быть равномерно размещены на поверхности металлической опалубки, как показано на рис. 4.38 [107] учитывая, что в номинальном режиме амплитуда напряжения на индукторе достигает $130 \div 135$ В, а также то, что максимальное напряжение на выходе понижающих трансформаторов T_{p2} и T_{p3} (рис. 4.29) приблизительно равно $U_{ex} = 500$ В, целесообразно индукторы соединять по три шт. последовательно, а полученные цепочки соединять параллельно и подключать к низковольтной обмотке этих трансформаторов. В этом случае, учитывая соотношение (4.11), можно окончательно принять количество индукторов $n_u = 30$, т.е. на выходе каждого силового трансформатора T_{p2} и T_{p3} будет включены параллельно 10 одинаковых ветвей, состоящих из 3 индукторов полное сопротивление такой нагрузки определяется посредством последовательного и параллельного суммирования сопротивлений индукторов Z_u . Порядок определения и численные значения Z_u представлены в разд. 3.5.

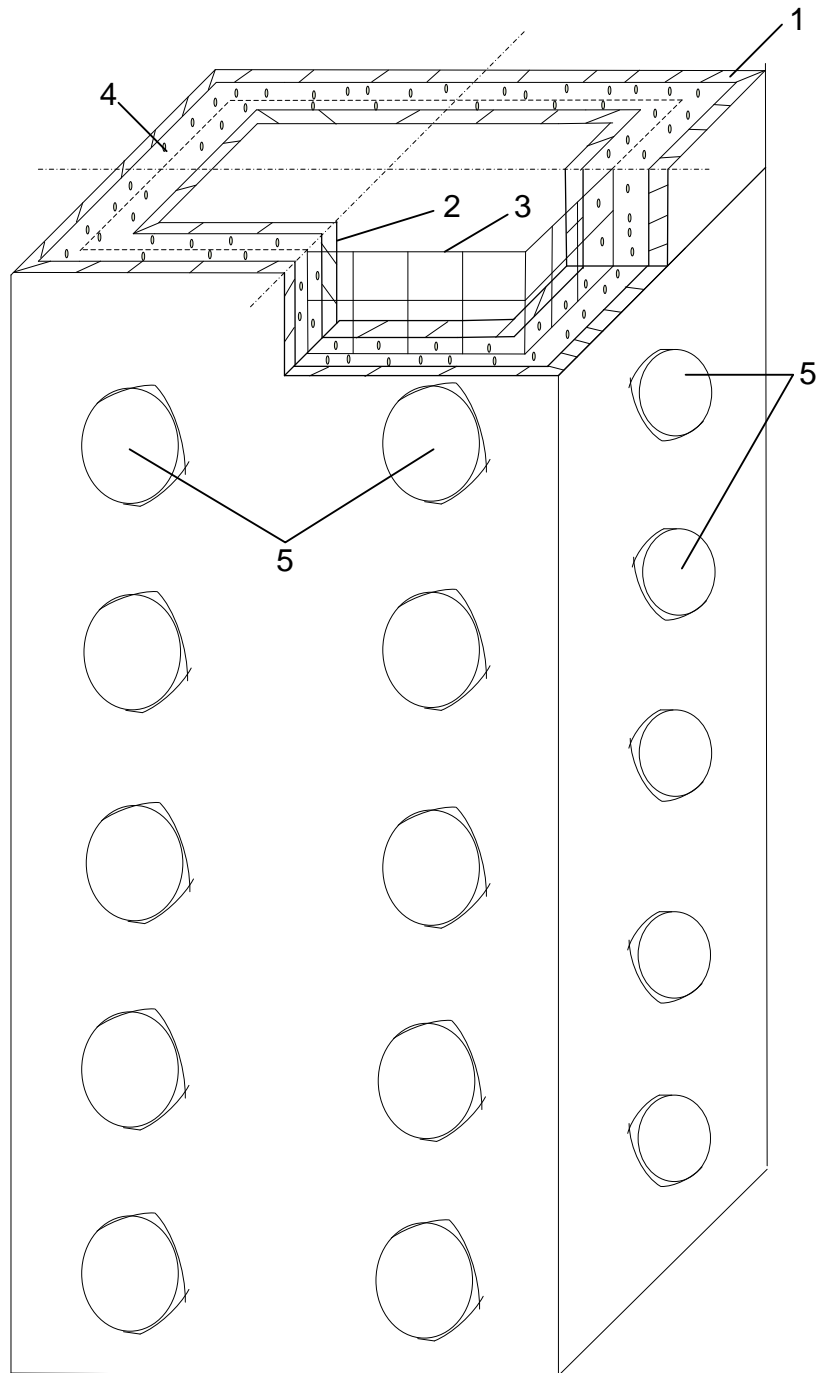


Рис. 4.38. Конструкция опалубки с индукционным нагревом для изготовления железобетонных элементов дымоудаления типа ШДЦ 12: 1 – наружная часть стальной опалубки; 2 – внутренняя часть стальной опалубки; 3 – арматура в виде плоской стальной сетки; 4 – бетон; 5 – индукторы на поверхности стальной опалубки

На рис. 4.39. представлены расчетные значения активной мощности передаваемой в нагрузку и КПД в зависимости от длины участков $l_{к1}$ и $l_{к2}$ кабельной линии.

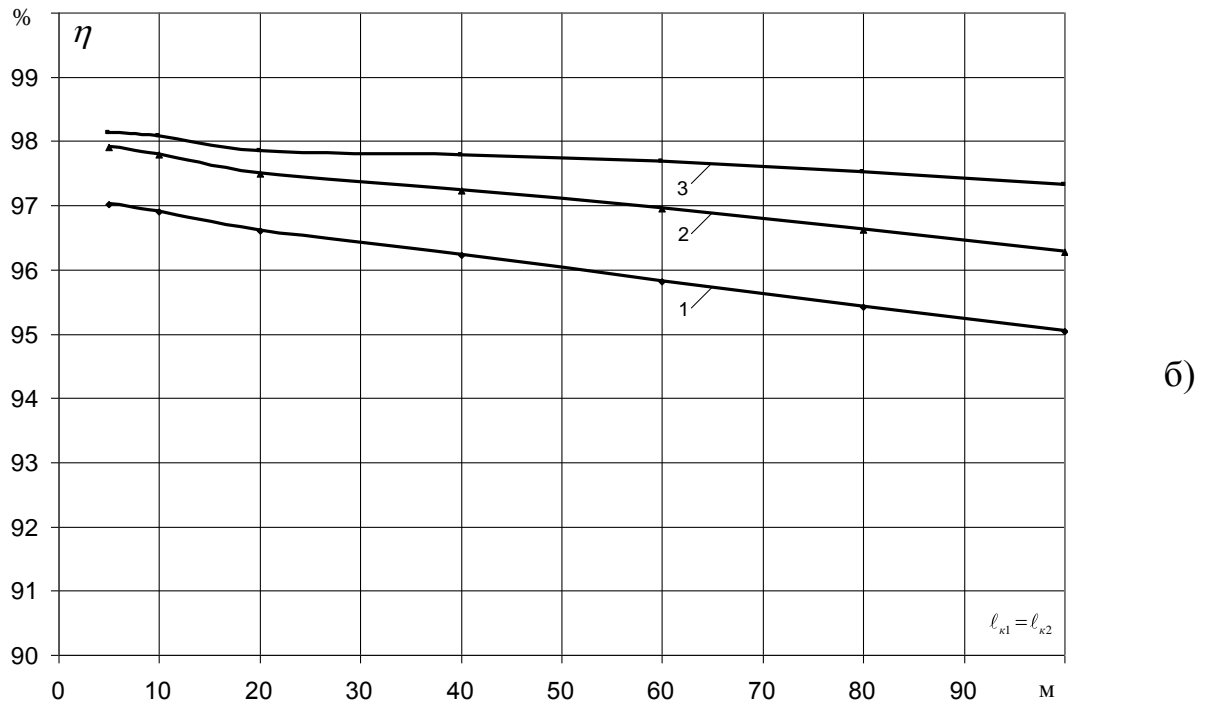
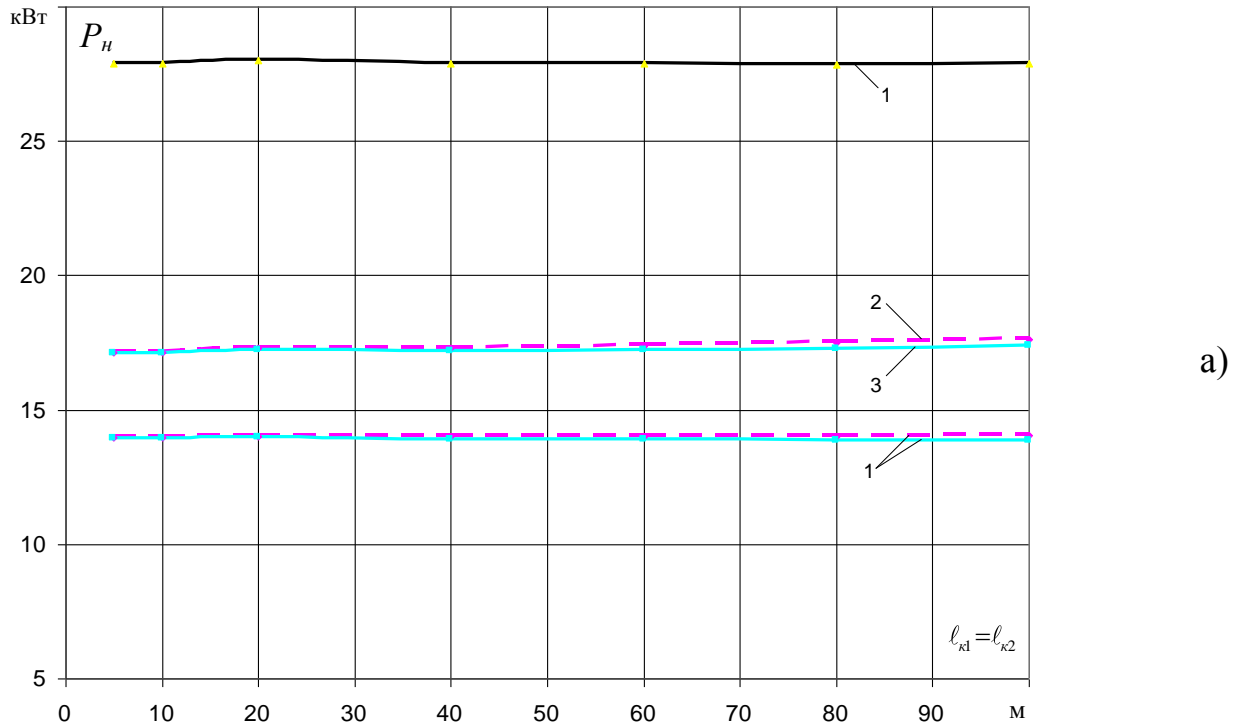
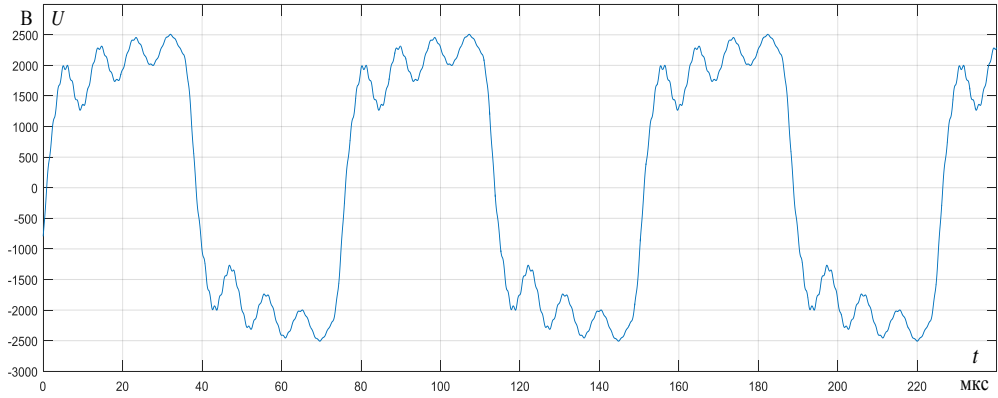
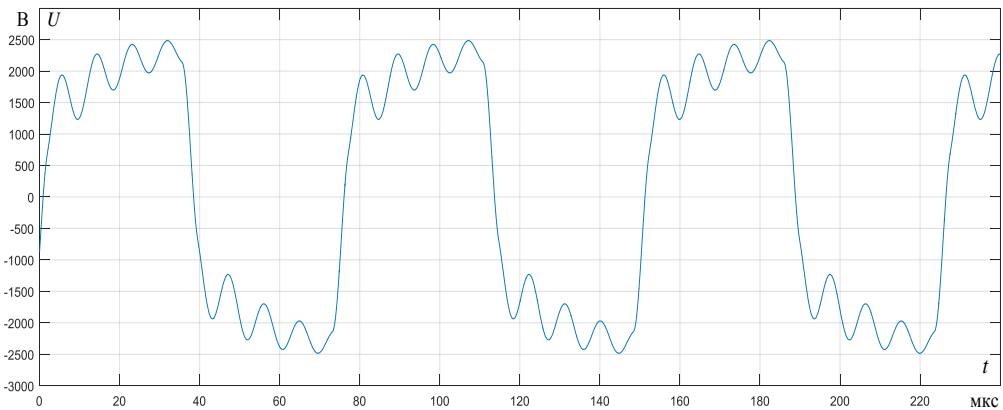


Рис. 4.39. Зависимости активной мощности (а), передаваемой в нагрузку, и КПД (б) от длины участков кабеля магистральной линии электроснабжения: 1 – нагрузка подключена в обеих точках (красный пунктир – мощность в точке отбора, зеленая сплошная – мощность в конце линии); 2 – нагрузка только в промежуточной точке; 3 – нагрузка только в конце кабельной линии; кабельная линия выполнена коаксиальным кабелем.

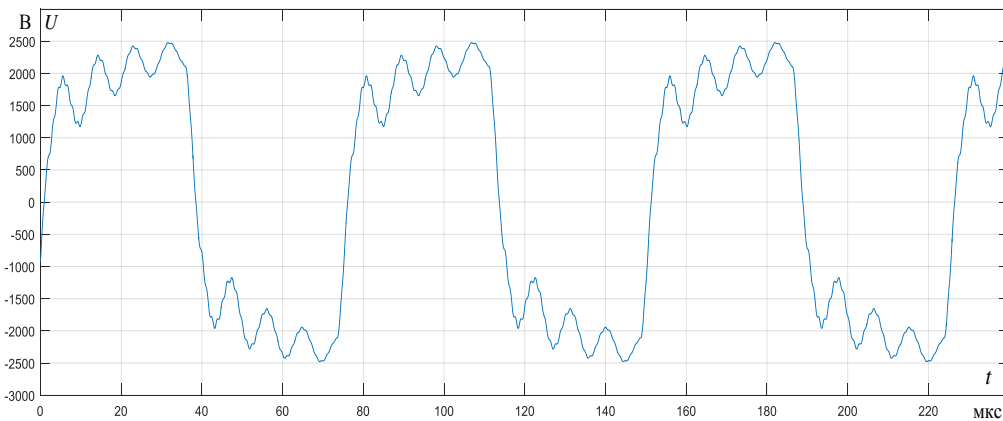
На рис. 4.40 и 4.41 представлены характерные расчетные осциллограммы напряжений на линии, на нагрузке и токов в нагрузке.



а)



б)



в)

Рис. 4.40. Характерные расчетные осциллограммы напряжения в начале кабельной линии (а), в промежуточной точке (б) и в конце линии (в) при полностью включенной нагрузке: длина участков кабельной линии – 60 м

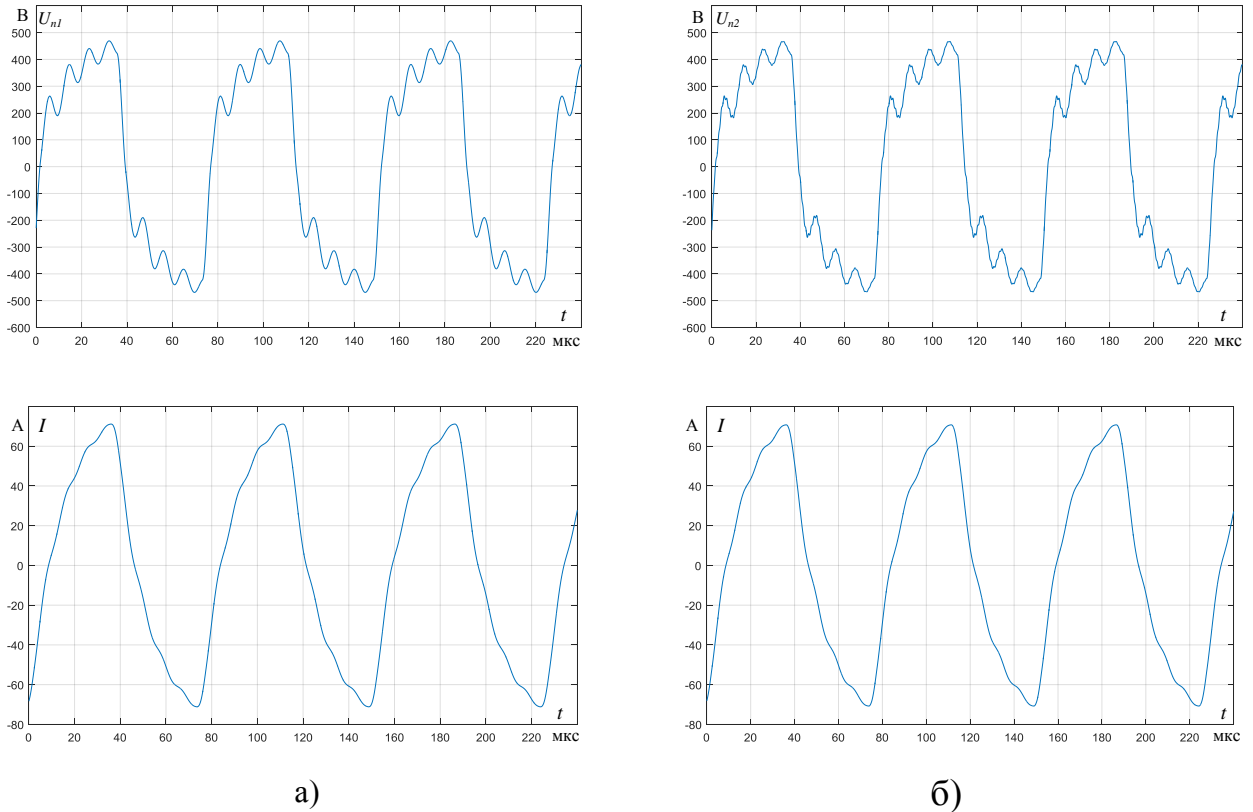


Рис. 4.41. Характерные расчетные осциллограммы напряжений U и токов I в нагрузке в промежуточной (а) и конечной точке (б) при длине участков кабельной линии 60 м

Полученные результаты (рис. 4.39÷4.41) свидетельствуют о вполне приемлемых показателях магистральных систем электроснабжения повышенной частоты при индуктивно-активном характере нагрузки [124].

4.6. Выводы по главе 4

1) Результаты теоретических исследований характеристик ЭТКПЧ, выполненные с помощью предложенных расчетных методики приведенных в гл. 3, позволили создать действующие лабораторные макеты ЭТКПЧ магистрального типа номинальной мощностью до 7 кВт и напряжением кабельной линии 1,25 кВ. Эти установки предоставили возможность экспериментально проверить и подтвердить достоверность теоретических разработок (гл. 2) [125].

2) Показано, что магистральные высоковольтные системы электроснабжения повышенной частоты по своим показателям нисколько не уступают системам электроснабжения радиального типа и в многих случаях могут оказаться более предпочтительными для практического применения.

3) Доказано, что системы электроснабжения на основе ЭТКПЧ пригодны для электропитания потребителей с ярко выраженной реактивной нагрузкой. Хотя в этом случае наблюдается некоторое снижение показателей энергетической эффективности, она остается на достаточно высоком уровне: КПД не ниже $95 \div 96\%$.

4) С помощью предложенных расчетных методик выполнено исследование характеристик реальных 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 установки при длине участков кабельной линии в 40 м в первом случае имеет величину порядка $97 \div 98,5\%$, во втором $95 \div 97,5\%$.

5) Даны рекомендации по конструктивному выполнению ЭТКПЧ, предназначенных для практического применения, что существенно облегчает внедрение в производство результатов настоящей работы [126].

6) Результаты экспериментальных и теоретических исследований демонстрируют ощутимое влияние параметров кабельных линий на характеристики ЭТКПЧ и подтверждают преимущество двухпроводных кабелей с воздушной и «полувоздушной» изоляцией (т.е. когда каждая токоведущая жила имеет твердую изоляцию в общем экране). Экспериментально 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 [87,127].

7) Выполненные исследования выявили возможность дальнейшего совершенствования ЭТКПЧ и ряд вопросов, подлежащих решению в будущем, поэтому целесообразно продолжение исследований по теме настоящей работы в целях создания и применения более совершенных вариантов ЭТКПЧ [128].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ содержания представленной работы позволяет сделать вывод, что все поставленные в ней задачи успешно решены.

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 ёмкостью 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 %.

Список литературы

1. Федоров А.А., Каменев В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для ВУЗов – 3-е изд., перераб. и доп. М. Энергия, 1979, 408 с.
2. Электроснабжение. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : конспект лекций / Л. С. Синенко, Е. Ю. Сизганова, Ю. П. Попов. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроснабжение : УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов).
3. ГОСТ 29322-2014 Напряжения стандартные.
4. Фролов Ю. М., Шелякин В. П. Основы электроснабжения: Учебное пособие. 1-е изд. Издательство: "Лань". 2012. 480 с.
5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.
6. 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.
7. Федосов С.В. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона/ С.В. Федосов, В.И. Бобылев, А.М. Соколов // Монография. Иваново: ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», ИВГПУ, 2016. – 336 с.
8. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях/ Под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездава – М.: НИИЖБ, 2005. - 276 с.
9. Федосов, С.В. Состояние и перспективы применения электротепловой обработки строительных материалов и изделий токами повышенной частоты/ С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, А.Н. Кузнецов, А.М. Соколов // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и

агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А.В. Лыкова. 2015. С. 291-299

10. Красносельских, Н.В. Комплексные исследования процессов электротепловой (электротермической) обработки токами повышенной частоты в производственных условиях / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2018). Сборник материалов межвузовской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. ИВГПУ. Иваново.2018. С. 326-327
11. 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
12. 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.
13. 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.
14. Титов, М.М. Технология предварительного электроразогрева бетонной смеси с использованием современного оборудования / М.М. Титов // Известия вузов. Строительство. №2. – 2009. – С. 56–62.
15. Ермилов, А.А. Электроснабжение промышленных предприятий / А.А. Ермилов, Б.А Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –144 с.

16. Шадриков, Т.Е. Методики расчета установившихся режимов и компонентов локальных электротехнических комплексов повышенной частоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Т.Е. Шадриков – Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т, 2017. – 244 с.
17. 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» (17 Бенардосовские чтения) Иваново, 2013 г. – С. 112–114.
18. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
19. ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В.
20. Федосов С.В. Принципы организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов, Гусенков А.В, Лебедев В.Д, Бочаров Ю.Н, Соколов А.М // Энергетик. 2014. №3. – С. 46-49.
21. Федосов С.В. Принципы организации современной электроэнергетики / С.В. Федосов. А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Ю.Н. Бочаров, Соколов А.М // продолжение. Энергетик. 2014. №4. С.15-18.
22. Митькин Ю.А. Разработка и исследование схемных и конструктивных решений для полупроводниковых источников питания электротехнологических и высоковольтных испытательных установок / Ю.А. Митькин, А.М. Соколов, А.В. Вихарев, М.Е. Тихов, А.В. Кириленко // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (16 Бенардосовские чтения) Иваново, 2011 г. С. 99

23. Шадриков, Т.Е. Разработка S-модели электротехнического комплекса повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.Д. Бачурина // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать четвертая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (15–16 марта 2018 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2018. — 1120 с. с. 207 ISBN 978-5-905486-08-1.
24. Шадриков, Т.Е. Моделирование элементов электротехнического комплекса повышенной частоты в SIMULINK / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.Д. Бачурина, А.С. Папина // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018»: материалы конференции. В 6 т. Т. 3. — Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2018. — 180 с., с. 160 ISBN 978-5-00062-354-1.
25. 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 научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» 2015 г («XVIII БЕНАРДСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ») т.1 с. 120-123.
26. Гусенков А.В. О возможности и целесообразности физического моделирования электропередачи с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений // А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // Энергетик. 2015. №4. С.29-32.
27. Гусенков А.В. Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков, А.С. Страхов // Электричество. 2016. № 1. С. 4-12.

28. 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 электро- и теплотехнологии» 2015 г («XVIII БЕНАРДОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»). т.1. С. 132-136.
29. Шадриков, Т.Е. Методика определения емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков, А.А. Дьячков, А.А. Симакова // Вестник ИГЭУ, 2016 г., Вып. 1. – С. 27–33.
30. Теория электрических цепей, Батура М.П., Кузнецов А.П., Курулёв А.П., Издательство: Вышэйшая школа. 2015. С.606.
31. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
32. Осипов Ю.М. Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей. Учебное пособие по курсам электротехники и ТОЭ. Ч. 2. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002 – С.99.
33. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С.301.
34. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. 2-е изд. – М.: Знак, 1998. – С.271.
35. Розанов Ю.К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С.184.
36. Твердотельная электроника: Учебное пособие / В.А. Гуртов; ПетрГУ. – Петрозаводск, 2004. – С.312.
37. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С.296.

38. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника, Москва: Техносфера, 2005. – С.632. ISBN 5-94836-051-2.
39. Ситников В.Ф. Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока // Электричество №2, 2008. – С.33–38.
40. Ситников В.Ф. Совершенствование методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе элементов гибких электропередач (FACTS). Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Иваново, 2009.
41. Исмагилов Р.Р., Гарифуллин И.М., Камалов М.С. Методика выбора параметров системы полупроводниковый преобразователь-ферромагнитный умножитель частоты Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа. 2010, С.189–194.
42. Рогинская Л.Э, Исмагилов Р.Р. Ферромагнитный учетверитель частоты Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. Уфа. 2010, С.290–294.
43. Липатов В.С. Тиристорные формирователи импульсов напряжения для управления высоковольтными коммутирующими электронными Электротехника. 2014. №5. – С.2-8.
44. Юлегин А.Н. Предел мощности параллельного инвертора на высокой частоте Электричество. 2014. № 12. – С.23-36.
45. Потери электроэнергии в высоковольтных преобразовательных установках большой мощности и некоторые пути их снижения/ Балыбердин Л.Л., Кощеев Л.А., Лозинова Н.Г., Ковалев В.Д., Мустафа Г.М.// Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2010. № 3. С. 7-12..

46. Силовые преобразовательные устройства. Базовые схемы и классификация. Шрайбер Дели. Компоненты и технол. 2009, №12. – С. 106-112.
47. Параллельно-последовательный преобразователь для ветрогенератора/ Купреев Т.А., Римарев И.В., Якименко И.В.// В сборнике: Энергетика, информатика, инновации - 2015. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции: в 2 томах. филиал ФГОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. 2015. С. 350-353.
48. Электронная компонентная база силовых устройств. Ч. 3. В. Ланцов, С. Эраносян. Сил. электрон. 2010, №2. – С.8–14.
49. Current multiplication by using multiple thyristors. Liu Z. Pemen A. J. M., van Heesch E. J. M., Vinands G. J. J. Rev. Sci. Instrum. 2008. 79, Ns 7, с. 075101/1-075101/3.
50. Преобразователь частоты: Пат. 2417509 Россия, МПК H02M 5/10 (2006.01), H02M 7/04 (2006.01). КубГАУ. О.В. Григораш, А.В. Винников, В.В. Алмазов, Н.Н. Кирьян, А.О. Григораш. №2010105579/07; Заявл. 16.02.2010; Опубл. 27.04.2011.
51. Кондаков Л.А, Щукин А.А. Матричные преобразователи частоты, Журнал «Информатизация и Системы Управления в Промышленности», № 1(43) 2013, с. 15-16 <http://isup.ru/articles/47/4353/>
52. Васин И.М, Махонин С.В, Скворцов Б.А. Способ формирования высокого напряжения матричного каскадного преобразователя частоты Электричество. 2012. № 9. – С. 51–55.
53. 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 Electron. 2010. 3, № 3, С. 345-354.
54. Розанов Ю.К, Лепанов М.Г, Киселев М.Г. Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя // Электротехника. 2014. № 8. – С. 51–59.

55. Шакирова А.И. Расширение функциональных возможностей преобразователей частоты для электротехнологий. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи "Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения", Уфа, 2-3 нояб., 2010: Материалы конференции. Уфа. 2010, С. 166-167.
56. Рогинская Л.Э, Исмагилов Р.Р, Горбунов А.С. Высокочастотный источник питания для электротехнологий. Физико-математическое моделирование систем: Материалы 7 Международного семинара, Воронеж, 26-27 нояб., 2010. Ч. 2. Воронеж. 2011. – С.189–194.
57. Чивенков, А.И. Определение соотношений параметров универсальной системы регулирования переменного тока / И.М. Трофимов, А.И. Чивенков, А. Гедифа, А.Б. Лоскутов, В.В. Севастьянов // Промышленная энергетика. – 2016. – №7. – С.19-24.
58. Чивенков, А.И. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети / А.И. Чивенков, В.И. Гребенщиков, А.П. Антропов, Е.А. Михайличенко // Инженерный вестник Дона, №1 (24), 2013. – С.93.
59. Чивенков, А.И. Моделирование работы инвертора напряжения в авиационных электросистемах / А.И. Чивенков, И.С. Панфилов, С.Ю. Панфилов, Н.Н. Вихорев, А. Гедифа. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, НГТУ им. Р.Е. Алексева, Н. Новгород, 2015. №1 (108) – С.217-224.
60. Белоруссов, Н. И. Радиочастотные кабели. Учебное пособие / Н.И. Белоруссов, И.И. Гроднев. - М.: Энергия, 1973. – С.328.
61. Белоруссов, Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева. - М.: Энергия, 1979. – С.416.

62. Бранзбург, Б.Я. Радиочастотные кабели в СССР / Б.Я. Бранзбург. - М.: Книга по Требованию, 2012. – С.135.
63. Рассел, Джесси Коаксиальный кабель / Джесси Рассел. - М.: Книга по Требованию, 2012. – С.128.
64. Хренков Н.Н, Лобанов А.В. Радиочастотные кабели. -М., Издатель: ДеЛибри. 2019. 344 с.
65. Высоцкий В.В. Сверхпроводимость 100 лет спустя АНИ "ФИАН-информ" /26.04.2011/ http://www.vniikp.ru/cable2.phtml?item_id=2644
66. Высоцкий В.С. Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия, Электричество. 2014 №11.– С.4–16.
67. Present status and future prospects of coated conductor development in Japan: Докл [Applied Superconductivity Conference, Seattle, Wash, Aug. 27-Sept. 1, 2006. Pt 3]. Shiohara Yuh, Yoshizumi Masateru, Yamada Yutaka, Izurni Teruo. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. 17, №2, ч.3. – С.3227-3230.
68. Основы кабельной техники: учебник для студ.высш.учеб.заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред, И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
69. Шадриков, Т.Е. Методика выбора рабочего напряжения высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 3 т., Т.1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015.– С.246.
70. Гусенков А.В, Лебедев В.Д, Шадриков Т.Е, Соколов А.М. Выбор рабочего напряжения высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты // Электротехника. №10.– 2016.– С.50–56
71. Шадриков, Т.Е. Перспективы разработки высоковольтных силовых трансформаторов не промышленной частоты/ Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V

- Международной науч.-техн. конф., г. Томск, 10–14 ноября 2014 г., В 2 т., Т.2. – Томск: Томский политехнический университет. – С.203–205.
72. Шадриков, Т.Е. Температурные режимы работы силового высоковольтного кабеля в электропередаче повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9–13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. Т 1. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т. им. В.И. Ленина», 2015. – С.618–620.
73. Шадриков, Т.Е. К вопросу о расчете токов короткого замыкания в установившемся режиме работы высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В., А.В. Гусенков, А.А. Дьячков // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25–26 февраля 2016г Москва): Тез. докл. В3т. Т.3. М. Издательский дом МЭИ, 2016.– С. 355.
74. Горобец А.Н. Разработка метода расчёта тепловых режимов высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9 – 13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. Т 1. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. – 628 с. 436-441
75. Митькин Ю.А, Соколов А.М. Карвалью Надир Карина Нето Африкану Де. К расчету температурных полей в объеме электротехнического материала при неоднородном распределении диэлектрических потерь. Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (17 Бенардосовские чтения) Иваново, 2013 г. – С.110-112.
76. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ кабеля «КАБЕЛЬnews», №10, 2009, С.47–51.

77. 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. Том 2 Часть 2 С.271–273.
78. 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 (секции 6-14) С.300-301.
79. 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». 2018. №2. С.17-26.
80. Tankoy A. 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 // А. Tankoy, Т.Е. Shadrikov, А.М. Sokolov // Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017». Том 3. С.291–292.
81. 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. Том 1. Ст 89–92.
82. Танкой А, Соколов А.М, Шадриков Т.Е // Совершенствование расчетных методик электротехнических комплексов повышенной

- частоты на основе полупроводниковых компонентов/(ПОИСК - 2018).
Межвузовская (с международным участием) молодёжная научно-техническая конференция 24 – 27 апреля 2018 г
«Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы» Ст_143-145.
83. Танкой А. Повышение точности и сокращение времени расчета установившихся режимов электротехнических комплексов повышенной частоты / А. Танкой, Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов. // Вестник ИГЭУ. Вып. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2019 – С.22–31.
84. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. Издательство: Лань. 2005.
85. Градштейн. И.С. Таблицы интегралов, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик под ред. А. Джеффри, Д. Цвиллингера. – 7-е изд: Пер. с анли. Под ред. В.В. Максимова. - СПб.: БХВ – Петербург, 2011. – С.1232.
86. 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 г. С.6-12.
87. 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
88. Калантаров Л, Цейтлин А.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга Издание третье, переработанное и дополненное Ленинград, ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ Ленинградское отделение 1986. С.447.

89. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения: Учебное пособие для вузов, МЭИ – 2007, С.245.
90. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Г.Н. Александров [и др.] ; Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР; под ред. Г.Н. Александрова.—Л.: Издательство Ленинградского университета, 1987.—С.232.
91. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Г.Е. Агафонов, [и др.]; под ред. Ю.И. Вишневого // СПб: Энергоатомиздат, 2002.—С.728.
92. Танкой А. Диагностика кабельной изоляции локационным методом / А.С. Новикова, А.Ю. Соболев // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 05-07 апреля «Энергия-2016».: РФ.—Иваново.—ISBN 978-5-00062-158-5.—Том 3. ИГЭУ —С.276-277.
93. Танкой А. Патент 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.
94. Гусенков А.В, Шадриков Т.Е, Соколов А.М, Соколов М.А, Митькин Ю.А // Высоковольтный кабель. Патент на изобретение № 2602513. Опубликовано: 20.11.2016 Бюл. №32.
95. 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. Том 1. – С.67–70.

96. Проектирование электрических аппаратов: [учебник для вузов] / Г. Н. Александров [и др.]; под ред. Г.Н. Александра.—Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985.—С.448.
97. Электрические аппараты высокого напряжения: [учебное пособие для вузов] / Г.Н. Александров [и др.] ; под ред. Г.Н. Александра.—Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1989.—С.344.
98. 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. 2017. №3. С.241-245.
99. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.1. Условия возникновения и защитные мероприятия // Электричество. 2015. №11. С.33-40.
100. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.2. Определение резонансных частот обмоток // Электричество. 2015. №12. С.20-25.
101. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерение напряжения в обмотках на резонансных частотах// Электричество. 2016. №1. С.20-24.
102. 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.
103. 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. Том 2 Часть 2 С.266–267.

104. Авербух М.А. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева / М.А. Авербух, Д.Н. Коржов // Белгород, 2016.
105. Авербух М.А, Коржов Д.Н. Гибридный фильтр в системах электроснабжения промышленных предприятий с установками индукционного нагрева. Научное обозрение. 2015. №15. С.208-211.
106. Авербух М.А. Гибридный фильтр в системах электроснабжения промышленных предприятий с установками индукционного нагрева / М.А. Авербух, Д.Н. Коржов // Научное обозрение: теория и практика. 2015. №3. С.54.
107. 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.Том 2 Часть 2 С.269–271.
108. 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 апреля 2018 г «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы». С.324-325.
109. Электротехнологические промышленные установки. Учебник для вузов / И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич, Н. М. Некрасова, А. Д.

- Свенчанский; Под ред. А. Д. Свенчанского. — М.: Энергоиздат, 1982. С.400.
110. Электрофизические основы техники высоких напряжений: [учебник / И. М. Бортник и др.] ; под общ. ред. И. П. Верещагина.—2-е изд., перераб. и доп.—М.: МЭИ, 2010.—С.704.
111. Танкой А. Свидетельство о государственной 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.
112. Иоссель Ю.А, Кочанов Э.С, Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. 2-е изд., перераб. и доп. Л. Энергоиздат. Ленингр. отд-ние. 1981. С.288.
113. Соколов А.М, Дьячков А.А, Котов В.А. Методика электромагнитного расчета взаимодействия кругового индуктора со стальной поверхностью// Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2019). Сборник материалов всероссийской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. ИВГПУ. Иваново.2019. С.290-293.
114. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля: Учеб пособие для студ. высш. учеб. заведений / С.А. Башарин, В.В. Федоров. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – С.304.
115. Бобылёв В.И. Перспективы использования электроразогрева бетонных смесей на предприятии крупнопанельного домостроения / Межвузовский сборник научных трудов «Высоковольтные техника и электротехнология». Вып. 1. Иваново 1997.
116. Федосов С.В, Бобылев В.И, Соколов А.М. Методика расчета параметров электротепловой обработки бетонных смесей и

- железобетонных изделий на установках периодического действия// Известия ВУЗов «Строительство». 2010. -№5. С.104-113.
117. Алимов Л.А, Баженов Ю.М, Воронин В.В. Технология бетона, строительных изделий и конструкций: Учебник для вузов. – М. Изд-во АСВ, 2004. С.256.
118. Железобетонные и каменные конструкции/ В.М. Бондаренко, Р.О. Бакиров и др. Под ред. В.М. Бондаренко – М.: Высшая школа, 2007. С.887.
119. Федосов С.В, Крылов Б.А, Бобылёв В.И, Пыжиков А.Г, Красносельских Н.В. // Применение электротепловой обработки железобетонных изделий на полигонных установках. Строительные материалы. №11 , 2013 г. С.36-39.
120. Федосов С.В, Красносельских Н.В, Коровин О.В, Соколов А.М. Электротепловая обработка железобетонных изделий токами повышенной частоты в условиях малых предприятий // Строительные материалы 2014. №5. С.8–14.
121. Волошин А.В. Малый бизнес в строительстве: перспективы развития// Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №3. С.129-132.
122. Федосов С.В, Бобылёв В.И, Петрухин А.Б, Соколов А.М. Оценка показателей экономической эффективности электротепловой обработки на предприятиях сборного железобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №3. С.54-57.
123. 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. Том 1. С.93-96.

124. 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. Том 1. – С.63–66.
125. 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., рук-ли 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. Том 3. С.309.
126. 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.
127. 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. 2019. T. 90. №8. – С.599-605.
128. Tankoy A. La centrale hydroélectrique d'imboulou. (République du Congo-Brazzaville) / A. Tankoy doctorant, E.A. Gudkova directrice // «Проблемы социальных и гуманитарных наук» десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных (ЭНЕРГИЯ-2015) Иваново, 21-23 апреля Том 7. С.235-236

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2676470

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КАБЕЛЬ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Соколов Александр Михайлович (RU), Шадриков Тимофей Евгеньевич (RU), Танкой Абель (RU)*

Заявка № 2017140011

Приоритет изобретения 16 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 ноября 2037 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018617603

Расчет магистральной электропередачи повышенной частоты

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Соколов Александр Михайлович (RU), Шадриков Тимофей Евгеньевич (RU), Танкой Абель (CG)*

Заявка № **2018614466**

Дата поступления **07 мая 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **26 июня 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы, автором которой является
Абель Танкой

Настоящим актом подтверждается, что на основе результатов, полученных аспирантом Абель Танкой в рамках диссертационных исследований, а именно на основе дальнейшего совершенствования и развития методологии разработки и применения электротехнических комплексов повышенной частоты, выполненных на основе транзисторных преобразователей напряжения большой мощности и предназначенных для создания промышленных локальных систем электроснабжения, разработаны и изготовлены действующие макеты электротехнического комплекса повышенной частоты в виде системы электроснабжения магистрального типа. Проведены испытания этих опытных образцов электротехнического комплекса повышенной частоты в условиях действующего производства для электроснабжения технологических установок, предназначенных для изготовления железобетонных изделий различного назначения (ж/б кольца, фундаментные блоки и т.п.) с применением электротепловой обработки токами повышенной частоты. Выполнены исследования характеристик установившихся режимов работы этих электротехнических комплексов.

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 Ивановская ДСК

Желтиков Н.М.

Начальник Цеха №5
ОАО Ивановская ДСК

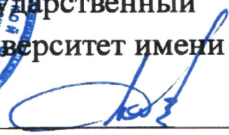
Мясников А.А.



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

 А.В. Гусенков

« 15 » января 2020 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы

Абель Танкой

Настоящим актом подтверждается, что результаты кандидатской диссертационной работы Абель Танкой на тему «Разработка локальной высоковольтной промышленной системы электроснабжения повышенной частоты» используются на кафедре «Высоковольтная электроэнергетика, электротехника и электрофизика» ИГЭУ в учебном процессе подготовки студентов по профилю «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника» направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) и по профилю «Техника и физика высоких напряжений» 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры) в лекционных, лабораторных и практических занятиях при изучении дисциплин «Основы электротехнологии» (в разделе, посвященном изучению перспективных высоковольтных полупроводниковых источников питания лазерной техники и других электротехнологических установок), «Высоковольтная силовая электроника» (в разделе, посвященном изучению перспективных систем промышленного электроснабжения повышенной частоты с использованием источников напряжения в виде транзисторных преобразователей напряжения на основе силовых высоковольтных IGBT транзисторов, а также при изучении схемотехнических решений в технологии гибких линий FACTS) и подготовке аспирантов.

Декан электроэнергетического
факультета, к.т.н., доцент

 А.Ю. Мурзин

Заведующий кафедрой ВЭТФ,
к.т.н., доцент

 С.А. Словесный