

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Борошнин Александр Леонидович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧИСЛА ФАЗ ДЛЯ ПИТАНИЯ УДАЛЕННЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Косоухов Федор Дмитриевич

Санкт-Петербург – Пушкин

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 НЕПОЛНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	11
1.1 Общие сведения	11
1.2 Двухпроводная система электропередачи В.А. Терехина	11
1.3 Вставка постоянного тока в трёхфазную систему электропередачи.....	15
1.4 Резонансная однопроводная система передачи и распределения электроэнергии, основанная на работах Н. Тесла	19
1.5 Однопроводная система электропередачи Азово-Черноморского инженерного института	23
1.6 Двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз	25
1.6.1 История разработки трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ).....	25
1.6.2 О разработках трансформаторных симметрирующих устройств.....	30
1.6.3 Разработка двухпроводной системы электропередачи с ТПЧФ.....	31
1.7 Выводы по первой главе.....	34
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ТПЧФ-1	36
2.1 Схема двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз	36
2.2 Анализ трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1 с конденсаторами на низкой стороне трансформатора.....	36
2.2.1 Цель и задачи анализа ТПЧФ-1	36
2.2.2 Допущения принятые при анализе ТПЧФ-1	37
2.2.3 Уравнения для ТПЧФ-1.....	39
2.2.4 Решение уравнений ТПЧФ-1	40
2.2.5 Определение параметров симметрирующих элементов ТПЧФ-1	44
2.2.6 Определение токов ТПЧФ-1	48
2.2.7 Определение напряжений ТПЧФ-1.....	58
2.2.8 Построение векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-1 при $\varphi =$ 0, $n = 1,0$, $I_n = I_{нном}$	59

2.2.9	Выводы из векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-1	63
2.2.10	Векторная диаграмма напряжений и токов ТПЧФ-1 при $\varphi = 60^\circ$, $n = 1,0$, $I_H = I_{ном}$	64
2.2.11	Определение мощности ТПЧФ-1	65
2.3	Выводы по второй главе.....	68
ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ТПЧФ-2 С ФАЗОПРЕОБРАЗУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА НИЗКОЙ СТОРОНЕ ТРАНСФОРМАТОРА		
69		
3.1	Цель и задачи анализа ТПЧФ-2	69
3.2	Уравнения для ТПЧФ-2	69
3.3	Решение уравнений для ТПЧФ-2	71
3.4	Определение параметров симметрирующих элементов ТПЧФ-2	73
3.5	Определение токов трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2	78
3.6	Напряжения трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2.....	83
3.7	Построение векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-2 при $\varphi = 0$, $n = 1,0$, $I_H = I_{ном}$	84
3.8	Мощности ТПЧФ-2.....	87
3.9	Выводы по третьей главе	91
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ		
92		
4.1	Электротехническое оборудование.....	92
4.1.1	Силовые трёхфазные трансформаторы, повышающий типа ТС-1, понижающий типа ТС-2	92
4.1.2	Конденсаторные батареи.....	98
4.1.3	Магнитный усилитель	100
4.1.4	Двухпроводная линия электропередачи	102
4.1.5	Нагрузочное устройство.....	103
4.1.6	Энергомонитор	104
4.2	Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз.....	108

4.3 Результаты экспериментального исследования двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз	114
4.4 Выводы по четвертой главе	116
ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОБЪЕКТОВ АПК.....	117
5.1 Технические характеристики удалённого от источников электроэнергии объекта АПК	117
5.2. Трехпроводная схема электроснабжения	117
5.3 Двухпроводная схема электроснабжения с использованием ТПЧФ.....	118
5.3.1 Расчёт подстанции ТП-2 с трансформаторным преобразователем числа фаз ТПЧФ-2	119
5.3.2 Расчёт подстанции ТП-1 с трансформаторным преобразователем числа фаз ТПЧФ-1	121
5.3.3 Выбор конденсаторных установок для трансформаторных преобразователей числа фаз	123
5.4. Капитальные затраты на электроснабжение объекта по двум вариантам ..	124
5.5. Выводы по пятой главе.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ И ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ТОКОВ ТПЧФ-1.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ТОКОВ ТПЧФ-2.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Г ГРАФИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Д РАСЧЁТ СМЕТНОЙ СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА.....	170

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сельские электрические сети России объединяют 2,2 млн. км линий электропередач 0,38 – 220 кВ, включая 290 тыс. км воздушных линий (ВЛ) 35 – 220 кВ, 1 млн 124 тыс. ВЛ 6 – 10 кВ, 786 тыс. км ВЛ 0,38 кВ, и 464 тыс. трансформаторных пунктов 6 – 35/0,4 кВ. Большая часть сельских электрических сетей построена в 50 – 70-е годы. Требуется замена более 75% линий электропередачи и трансформаторных подстанций [54].

Потери электроэнергии в сельских электрических сетях за последние 15 лет возросли на 20 – 25 процентов.

Указ Президента Российской Федерации №529 от 18 июня 2024 года «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий» в качестве первого приоритетного направления научно-технологического развития указывает высокоэффективную и ресурсосберегающую энергетику, а в качестве первой критической технологии - создание высокоэффективных систем генерации, распределения и хранения энергии.

В качестве одного из эффективных средств снабжения электроэнергией сельскохозяйственных потребителей может рассматриваться резонансная система передачи и распределения электроэнергии, основанная на работах Н. Тесла [35, 54]. Существенным её недостатком является малая мощность этой системы электропередачи – 20 кВт [75].

Наиболее перспективной системой электропередачи для электроснабжения сельского хозяйства можно рассматривать двухпроводную систему электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз, разработанную в Санкт-Петербургском государственном аграрном университете [37].

В рассматриваемой системе электропередачи электрическая энергия от трёхфазного источника преобразуется с помощью трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ) ТПЧФ-1 в энергию однофазного тока высокого напряжения, которая по двухпроводной линии передаётся к трансформаторному преобразователю числа фаз ТПЧФ-2. В нём энергия однофазного тока преобразуется в энергию трёх-

фазного тока с понижением напряжения до необходимого уровня. Таким образом, фазопреобразующими элементами в данной системе электропередачи является обыкновенный трёхфазный трансформатор со специальной схемой соединения обмоток и две конденсаторные батареи, которые, одновременно с фазопреобразованием, обеспечивают компенсацию реактивной мощности энергосистемы. Конденсаторные батареи могут быть включены как с высоковольтной стороны трансформатора, так и с низковольтной его стороны. Поэтому напряжение линии электропередачи при подключении конденсаторов с низковольтной стороны трансформатора может составлять 10 кВ, а с высоковольтной стороны – 35, 110 кВ.

Что касается величины номинальной мощности данной системы электропередачи, то особых ограничений для ТПЧФ нет, так как в нём применяется обыкновенный трёхфазный трансформатор.

Протяжённость двухпроводной линии электропередачи зависит от уровня её напряжения, и может достигать таких же значений, как и для трёхпроводных линий напряжением 10, 35 и 110 кВ.

Важным вопросом диссертационной работы является разработка метода анализа и анализ трансформаторных преобразователей числа фаз с включением фазопреобразующих элементов на низкой стороне трансформаторов. Впервые анализ таких ТПЧФ произведён во второй и третьей главе представленной диссертации.

На основе анализа ТПЧФ определены зависимости параметров конденсаторных батарей, обеспечивающих заданный режим работы системы электропередачи, а также установлены зависимости токов, напряжений и мощностей трансформатора и фазопреобразующих элементов от величины нагрузки, и её коэффициента мощности. Эти зависимости необходимы при проектировании трансформаторных преобразователей числа фаз.

Степень разработанности темы исследования. В решение вопросов повышения эффективности электрификации сельского хозяйства и исследования новых энергетических технологий внесли существенный вклад такие учёные как: И.А. Будзко, И.Ф. Бородин, П.П. Безруких, Д.С. Стребков, Ю.Н. Астахов, А.Ф. Дьяков, А.П. Коршунов, Н.С. Канакин, Ф.Д. Косоухов, Т.Б. Лещинская,

В.Э. Воротницкий, Н.М. Попов, А.П. Сердешнов, С.И. Смоловик, Н.Н. Сырых, В.Н. Карпов, И.В. Юдаев и другие исследователи.

Цель работы. Установить работоспособность трансформаторных преобразователей числа фаз с включением фазопреобразующих элементов на низкой стороне трансформаторов для совершенствования систем электроснабжения удалённых от источников электроэнергии объектов АПК, а также проверить соответствие расчётных и опытных параметров фазопреобразующих элементов ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих неполнофазных электроэнергетических систем.
2. Разработка математических моделей трансформаторных преобразователей числа фаз с фазопреобразовательными элементами на низкой стороне трансформатора и анализ таких моделей.
3. Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа.
4. Техничко-экономическое обоснование вариантов электроснабжения объектов АПК.

Объект исследований. Системы электроснабжения удалённых от источников электроэнергии объектов АПК.

Предмет исследования. Преобразование трёхфазного тока в однофазный и однофазного тока в трёхфазный в двухпроводных системах электропередачи с помощью трансформаторных преобразователей числа фаз.

Методы исследований. Теоретические исследования базируются на положениях теории электрических цепей: метод симметричных составляющих, комплексный метод, матричный метод решения комплексных уравнений. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с действующими стандартами, с применением современной измерительной техники (Энергомонитор 3.3Т1 – прибор для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии обладающий классом точности 0,1). Результаты теоретических

и экспериментальных исследований обладают достаточной точностью и сходимостью.

Соответствие паспорту специальности 4.3.2 - «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса».

Содержание диссертации соответствует следующему направлению исследований: «Способы и технические средства передачи и распределения электроэнергии, принципы построения сельских электрических сетей и их компонентов, надёжность и качество электроснабжения, средства мониторинга, автоматизации и интеллектуализации электроснабжения».

Научная новизна:

1. Впервые произведён анализ трансформаторных преобразователей числа фаз с установкой фазопреобразующих элементов на низкой стороне трансформаторов, в результате которого определены параметры фазопреобразующих элементов, а также зависимости токов и напряжений от величины и $\cos \varphi$ нагрузки.
2. Разработана методика построения векторных диаграмм для трансформаторных преобразователей числа фаз с помощью которой подтверждена достоверность методики анализа трансформаторных преобразователей числа фаз.
3. Исследована возможность использования двухпроводной системы электропередачи трехфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз, защищённой патентом на изобретение РФ № 2532534.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Применение трёхфазных силовых трансформаторов для изготовления трансформаторных преобразователей числа фаз для двухпроводной системы электропередачи.
2. Изготовление физической модели двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз.
3. Экспериментальное исследование физической модели двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа

фаз, в результате которого установлена работоспособность системы в диапазоне изменения трёхфазной нагрузки от холостого хода до номинальной.

4. Экспериментальное подтверждение возможности включения фазообразующих элементов с низкой стороны трансформаторов ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа трансформаторных преобразователей числа фаз ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 с включением фазообразующих элементов с низкой стороны трансформаторов.
2. Векторные диаграммы ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 и основные выводы из них.
3. Физическая модель двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз.
4. Результаты экспериментального исследования физической модели двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз.

Достоверность и апробация результатов: Достоверность результатов при теоретических исследованиях ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 достигнута примером векторных диаграмм токов и напряжений преобразователей числа фаз, построенных для различных значений коэффициента мощности трехфазной нагрузки.

Достоверность экспериментальных исследований достигнута выбором высокоточных приборов для измерения электроэнергетических величин, а также соблюдением требований действующих стандартов.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международных научно-технических конференциях в Санкт-Петербургском государственном аграрном университете в 2013-2024 г.г., на 6-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Инновации в сельском хозяйстве», 15-16 декабря 2015 г. (ФГБНУ ВИЭСХ, Москва); на Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии», 23-25 ноября 2016 года (МЭИ, Москва), на международной научно-практической конференции «Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития» в ФГБОУ ВО Омского ГАУ – 2024 г.

Внедрение. Разработанная автором методика расчёта двухпроводной системы электропередачи принята к внедрению в сетевых и сбытовых компаниях о чём имеются соответствующие акты о внедрении (приложение А).

Личный вклад автора: активное участие в разработке патента №2532534 «Двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз»; разработка «Методики анализа трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2) с конденсаторами на низкой стороне трансформатора»; анализ трансформаторных преобразователей числа фаз ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 с конденсаторами на низкой стороне трансформаторов с последующей проверкой расчётных данных экспериментальными данными; разработка двухпроводной системы электропередачи с конденсаторами на низковольтной стороне трансформаторов и проведение её экспериментальных исследований на физической модели сети 0,4 кВ в лаборатории кафедры.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 7 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на изобретение (приложение А).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 86 наименований и пяти приложений. Работа изложена на 235 страницах машинного текста, содержит 42 рисунка и 23 таблицы.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю, а также всем лицам, которые способствовали успешному завершению его диссертационного исследования.

ГЛАВА 1 НЕПОЛНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

1.1 Общие сведения

Существующие электрические системы 6 – 10 – 35 – 220 кВ выполняются, как правило, трёхфазными трёхпроводными, для создания которых требуются значительные материальные средства. Для снижения капитальных затрат на строительство полнофазных линий электропередачи в России разработаны неполнофазные электроэнергетические системы, содержащие двухпроводные и однопроводные высоковольтные линии.

К таким системам относятся:

1. Двухпроводная система электропередачи В.А. Терехина.
2. Вставка постоянного тока в трёхфазную систему электропередачи, разработка НИИ Постоянного тока.
3. Резонансная однопроводная система передачи и распределения электроэнергии, основанная на работах Н. Тесла. Выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский Научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства». (ФГБНУ ВИЭСХ).
4. Однопроводная система электропередачи, выполненная в Азово-Черноморском инженерном институте – филиале ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет».
5. Двухпроводная система электропередачи с применением трансформаторных преобразователей числа фаз разработана кафедрой электроэнергетики и электрооборудования Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ).

Рассмотрим названные пять неполнофазных электрических систем.

1.2 Двухпроводная система электропередачи В.А. Терехина

В 1930 – 1940 годы в сельском хозяйстве применялись двухпроводная система электропередачи «два провода – земля» (ДПЗ) и однопроводная система «один провод – земля» (ОПЗ).

Под руководством заведующего кафедрой Применения электрической энергии в сельском хозяйстве Ленинградского института механизации и электрификации сельского хозяйства Ю.В. Скобельцина, разработана система использования земли в качестве силового провода сельских воздушных линий высокого напряжения, получившая в своё время практическое применение. Доцентом Ленинградской лесотехнической академии В.А. Терехиным разработаны системы ДПЗ и ОПЗ, внедрённые им в электрификацию лесоразработок [67] и в решение проблемы электромолотьбы [65, 66].

В двухпроводной системе электропередачи ДПЗ используются два трёхфазных трансформатора, первичная и вторичная обмотки которых соединены звездой. Повышающий трансформатор Т1 подключается к трёхфазному источнику питания (рисунок 1.1). Вторичные обмотки «а₁», «в₁» подсоединены к двухпроводной высоковольтной линии, а обмотка фазы «с₁» подключена к рабочему заземлителю З1. Понижающий трансформатор Т2 двумя первичными обмотками А₂ и В₂ подключён к линии, третьей обмоткой С₂ – к рабочему заземлителю З2. Ко вторичной обмотке трансформатора Т2 подключаются трёхфазные электроприемники.

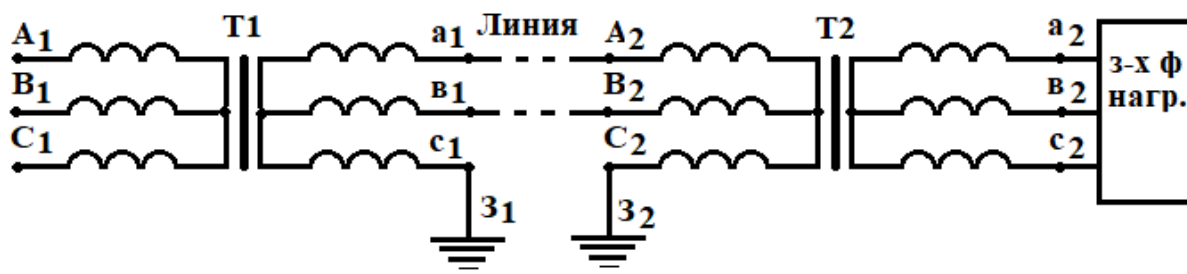


Рисунок 1.1 – Схема двухпроводной системы электропередачи ДПЗ [66]

Основной недостаток этой системы заключается в следующем. В связи с тем, что сопротивление проводов линии отличается от сопротивления двух заземлителей, система электропередачи является несимметричной. Поэтому трёхфазная система токов в ней будет несимметричной при симметричной нагрузке. В результате этого, на выходе понижающего трансформатора Т2 трёхфазная система напряжений будет несимметричной со всеми вытекающими отсюда отрицательными последствиями.

Получив определённый (отрицательный) опыт использования земли в качестве силового провода, В.А. Терехин разработал двухпроводную систему электропередачи с конденсаторной батареей. Простейший трансформаторный преобразователь числа фаз (ТПЧФ) содержит трёхфазный силовой понижающий трансформатор, первичные обмотки которого соединены звездой, к началам двух обмоток подсоединена двухпроводная линия, а начало третьей обмотки через конденсаторную батарею C подключено к одному из проводов линии (рисунок 1.2).

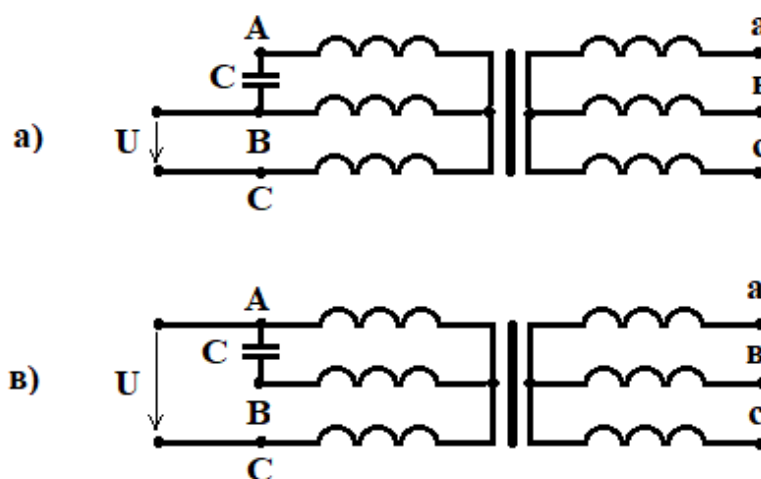


Рисунок 1.2 – Схема ТПЧФ системы В.А. Терехина [66]

Ф.Д. Косоухов провёл в 1964 году экспериментальное исследование ТПЧФ системы В.А. Терехина в лаборатории кафедры теоретической и общей электротехники ЛСХИ (сейчас Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (СПбГАУ)). Некоторые результаты этих исследований опубликованы в Записках Ленинградского сельскохозяйственного института [23]. Установлено, что минимальный коэффициент обратной последовательности междуфазных напряжений K_{2U} ТПЧФ при определенных нагрузке и $\cos \varphi_H$ зависит от величины ёмкости конденсаторной батареи.

На рисунке 1.3 представлен график зависимостей $K_{2U} = F(C)$.

Кривые 1, 2, 3 соответствуют схеме рисунок 1.2,а при $\cos \varphi_H = 0,7$ и нагрузках, соответственно, 30, 60 и 100% от номинальной; кривая 4 снята для схемы рисунка 1.2,в при нагрузке 60% от $S_{ном}$ и $\cos \varphi_H = 0,7$, а кривая 5 относится к схеме рисунок 1.2, а при нагрузке 100% от $S_{ном}$ и $\cos \varphi_H = 0,5$.

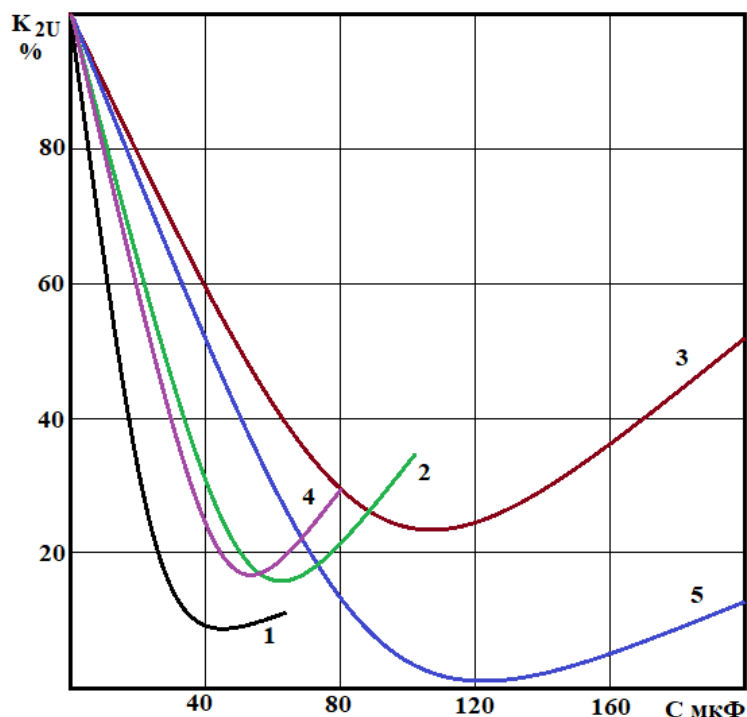


Рисунок 1.3 – Зависимость коэффициента обратной последовательности напряжений ТПЧФ системы В.А. Терехина от ёмкости [23]

Выводы по ТПЧФ системы В.А. Терехина:

1. ТПЧФ системы В.А. Терехина с регулируемой ёмкостью обладает значительно меньшим коэффициентом несимметрии линейных напряжений в диапазоне нагрузок 20 – 100% от номинальной, по сравнению с ТПЧФ, ёмкость которого постоянна.
2. В оптимальном режиме преобразователя ТПЧФ с регулируемой ёмкостью обеспечивает $K_{2U} < 5\%$ только при определенных по величине нагрузках и $\cos \varphi_H = 0,5 - 0,8$. В диапазоне изменения нагрузки от х.х. до номинальной при указанных $\cos \varphi_H$ оптимальный K_{2U} изменяется, увеличиваясь при некоторой нагрузке до 30%. При $\cos \varphi_H > 0,8$ несимметрия напряжения значительно увеличивается и при активной нагрузке K_{2U} достигает, примерно, 50%.
3. Для получения оптимального K_{2U} , с изменением нагрузки, ёмкость необходимо изменять как в зависимости от величины нагрузки, так и от $\cos \varphi_H$. При постоянном $\cos \varphi_H$, ёмкость пропорциональна величине активной нагрузки.

4. Для $\cos \varphi_n > 0,5$, ёмкость следует включать по схеме рисунок 1.2, а; а для $\cos \varphi_n \leq 0,5$ – по схеме рисунок 1.2, в.

1.3 Вставка постоянного тока в трёхфазную систему электропередачи

Основным преимуществом постоянного тока над переменным является значительное удешевление линий электропередачи, что может дать большую экономическую и техническую выгоду. Последнее вызывается рядом факторов.

Действующее значение выпрямленного напряжения равно амплитудному, в линии переменного тока – действующее значение напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного, и так как изоляция ЛЭП рассчитывается на максимальное мгновенное значение напряжения, то в ЛЭП постоянного тока уровень изоляции может быть снижен в $\sqrt{2}$ раз. Аналогично и коронирование линии постоянного тока начинается при напряжении в $\sqrt{2}$ раза большем.

В линии постоянного тока нет индуктивного сопротивления, ёмкостных токов, меньше потери в изоляции, меньше активное сопротивление токоведущих частей в связи с отсутствием поверхностного эффекта, поэтому потери энергии в ЛЭП постоянного тока будут ниже, чем в ЛЭП переменного тока.

Для ЛЭП постоянного тока требуется значительно меньше проводникового материала, изоляции и арматуры не только за счёт уменьшения уровня изоляции, но и подвески двух проводов для передачи.

При передаче энергии постоянным током не возникает проблемы устойчивости работы системы, ЛЭП постоянного тока допускает значительные кратковременные перегрузки, величина и продолжительность которых лимитируется только конечным оборудованием подстанций, нет необходимости в установке аппаратов компенсации реактивной мощности в линии, в кабельных линиях – нет диэлектрических потерь в изоляции и потерь на вихревые токи в оболочке и броне одножильных кабелей.

Линия электропередачи постоянного тока может распределять мощность между системами, работающими с равной частотой или асинхронно. Для такой линии не требуется синхронизация генераторов на разных её концах или проверка синхронизма после АПВ.

Связь систем на постоянном токе не увеличивает токов короткого замыкания, что позволяет применять более облегчённую аппаратуру по условиям электродинамической и термической устойчивости.

В 1963 г. «Росгипросельэлектро» совместно с НИИПТ выполнило проектное задание электропередачи постоянного тока Новленское – Никольский Торжок для электроснабжения сельского района в Вологодской области [48].

Исходные данные для проектирования, полученные от энергосистемы и уточнённые при обследовании электроснабжаемого района, были следующие:

1. Строительная длина линии 44,1 км; климатические условия – 1 район гололёдности.
2. Максимальная потребная мощность на шинах 10 кВ Николо-Торжокской подстанции – 1805 кВт при $\cos \varphi = 0,8 - 0,9$, минимальная мощность составляет 25 % от максимальной при $\cos \varphi = 0,6 - 0,7$.
3. Место присоединения проектируемой электропередачи – Новленская подстанция 35/10 кВ.
4. Энергия к месту присоединения проектируемой электропередачи подаётся от Вологодского опорного пункта 110/35/10 кВ «Западная» по линии 35 кВ длиной около 57 км, с проводами АС-185 (на расстояние около 2 км) и АС-50 (на расстояние 55 км). От этой линии получают энергию две промежуточные подстанции, одна из них имеет мощность 2х1800 кВА, вторая – 1800 кВА, помимо понизительной подстанции, питающей местный район потребления в Новленском.
5. Число часов использования максимума $T=3000$ ч, число часов потерь $\tau=1700$ ч.

Принципиальная электрическая схема электропередачи постоянного тока Новленское – Никольский Торжок приведена на рисунке 1.4.

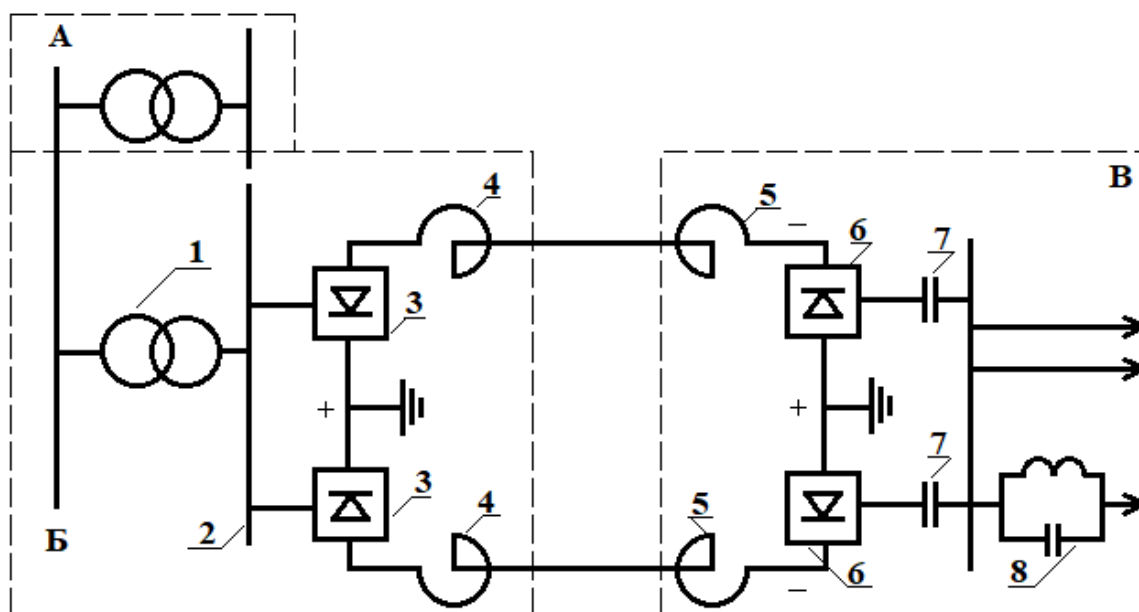


Рисунок 1.4 А – трёхфазная п/ст 35/10 кВ в п. Новленское, Б – преобразовательная п/ст в п. Новленское [48]:

1 – силовой трансформатор, 2 – РУ – 10 кВ преобразовательной п/ст, 3 – выпрямитель, 4 – реактор;

В – инверторная п/ст в п. Никольский Торжок:

5 – реактор, 6 – инвертор, 7 – конденсаторы, 8 – фильтры высших гармоник.

«Передача принята двухполюсная, с выпрямлённым напряжением каждого полюса 15 кВ при одинаковой их полярности, отрицательной по отношению к земле.

Схема электропередачи постоянного тока включает следующие элементы:

1. Выпрямительная подстанция сооружается на площадке существующей РТП 35/10 кВ в посёлке Новленское. Для силового (выпрямительного) трансформатора мощностью 1800 кВА сооружается открытое распределительное устройство с установкой масляного выключателя и разъединителя 35 кВ. Трансформатор для питания преобразователя тока выбран один на оба полюса, типа ТМ-1800/35, наружной установки, с напряжением 29/10,5 кВ, с пониженным коэффициентом трансформации, что диктуется необходимостью обеспечения достаточно высоких уровней напряжения у потребителей района.
2. Обратное преобразование постоянного тока в переменный производится на инверторной подстанции двумя мостовыми преобразователями, выполнен-

ными на тиратронах ТР-1-40/15 аналогично преобразователям выпрямительной подстанции.

Мостовые преобразователи к шинам 10 кВ подстанции присоединяются без трансформатора через последовательные конденсаторы и реакторы, необходимые для обеспечения коммутации тока вентилях. К шинам 10 кВ также подключаются параллельные батареи – фильтры, необходимые для обеспечения коммутации тока инвертора и компенсации реактивных нагрузок, которые выполняются в виде отдельных фильтров 5, 7, 11 и 13-й гармоник тока. На инверторной подстанции, также, как и на выпрямительной, устанавливаются сглаживающие линейные реакторы, шунтирующие вентили реакторов, фильтры 6-й гармоники выпрямительного напряжения. Полуса на приёмном конце передачи соединены между собой электрически в целях возможного взаимного резервирования мостов.

Технико-экономическое сравнение вариантов электропередачи на постоянном и переменном токе выполнено в соответствии с «Основными методическими положениями технико-экономических расчётов в энергетике». При определении суммарных капиталовложений затраты на проектные и научно-исследовательские работы не учитывались» [48]. Технико-экономическое сравнение двух вариантов электроснабжения приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технико-экономическое сравнение вариантов электроснабжения [48]

Узлы энергосистемы	Затраты в тыс. руб	
	Электропередача постоянного тока	Электропередача трёхфазного переменного тока
Головная ячейка ЛЭП-35 кВ	–	3,61
Подстанция 35/10 кВ в посёлке Никольский Торжок	–	31,34
Выпрямительная подстанция	29,35	–
Инверторная подстанция	68,05	–
ЛЭП и связь	57,37	118,9
Общая сметная стоимость	179,71	181,89

Большие денежные средства и количества материалов (свыше половины капиталовложений на электрификацию сельского хозяйства) расходуются на сооружение электрических сетей, которые являются одним из основных элементов сель-

ского электроснабжения. Поэтому особенно важно продолжать поиски наиболее экономических решений в проектировании и строительстве сельских ЛЭП и подстанций, при составлении схем электроснабжения областей и районов.

1.4 Резонансная однопроводная система передачи и распределения электроэнергии, основанная на работах Н. Тесла

Система разработана в Государственном научном учреждении Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ). Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, академик РАСХН Стребков Дмитрий Семёнович.

Основные разработки однопроводной системы в ВИЭСХ выполнены в 1998 – 2012 гг., по которым получены патенты РФ на «Способ и устройство для передачи электрической энергии» [32 – 41, 43, 44], опубликованы научные статьи [8, 13, 46, 58, 59, 62, 64], защищена кандидатская диссертация Роциным Олегом Алексеевичем в 2006 г. на тему: «Разработка резонансной системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей малой мощности» [54]. На основании этих материалов ниже приводится описание этой системы.

«На рисунке 1.5 представлена блок-схема способа передачи электрической энергии, где генератор повышенной частоты 1, повышающий высокочастотный трансформатор 2, однопроводная линия 3, однофазный мостовой выпрямитель 4, нагрузка 5, ёмкость нагрузки 6, естественная ёмкость в виде земли, воды или изолированного проводящего тела 7, инвертор 8, преобразующий постоянный ток в переменный.

Электрическая энергия из генератора высокой частоты 1 поступает в повышающий высокочастотный трансформатор Тесла 2. Резонансные колебания электромагнитной энергии создают в цепи, состоящей из генератора 1, трансформатора Тесла 2, однопроводной линии 3, однофазного выпрямителя 4, нагрузки 5, конденсатора нагрузки 6 и естественной ёмкости 7, потенциал одного из выводов высоковольтной обмотки трансформатора 2, повышают и передают по однопроводной линии 3 на один из входов 9 однофазного мостового выпрямителя 4.

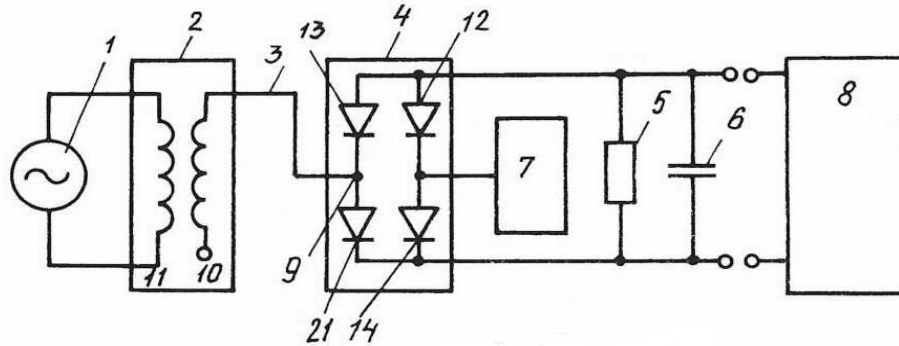


Рисунок 1.5 – Резонансная система электроснабжения малой мощности [35]

Способ передачи электрической энергии реализуется следующим образом.

Потенциал второго вывода 10 высоковольтной обмотки трансформатора Тесла 2 равен нулю, поэтому этот вывод 10 изолируют или соединяют с низковольтной обмоткой 11 трансформатора Тесла 2 и с землёй.

Положительную половину резонансных высокочастотных колебаний тока и напряжения после прохождения через вход 9 однофазного выпрямителя 4 выпрямляют на диоде 21 и передают через нагрузку 5 и конденсатор нагрузки 6, диод 12 в естественную ёмкость 7.

Отрицательную полуволну резонансных высокочастотных колебаний тока и напряжения выпрямляют на диоде 12 и передают через нагрузку 5 и конденсатор нагрузки 6, диод 14 в естественную ёмкость 7. В качестве естественной ёмкости 7 используют изолированное проводящее тело, заземление или присоединение к водной среде. На нагрузке 5 и конденсаторе нагрузки 6 получают постоянное выпрямленное напряжение. Для получения переменного напряжения стандартной частоты 50 или 60 Гц выпрямлённое напряжение подают с конденсатора 6 на вход инвертора 8, в этом случае сопротивление нагрузки 5 устанавливают на выходе инвертора 8.

В результате использования настоящего устройства потери в однопроводной линии уменьшаются до величины, определяемой потерями на корону и утечку через изоляцию однопроводной линии 3.

Потери энергии через естественную ёмкость также минимальны, так как электрическая энергия, идущая на перезарядку естественной ёмкости, проходит и используется в нагрузке 5 и конденсаторе нагрузки 6.

Благодаря электростатическому механизму передачи электроэнергии в линии снижаются джоулевые потери, что позволяет увеличить длину линий электропередач при передаче электрической энергии на стационарные объекты и на мобильные объекты на земле, в водной и воздушной среде» [35].

Выводы по резонансной системе:

1. Разработан новый резонансный метод передачи электрической энергии на частоте 1-25 кГц с использованием преобразователя частоты, резонансного контура, повышающего высокочастотного трансформатора и волноводной однопроводниковой линии напряжением 1-10 кВ со сдвигом фаз между ёмкостным зарядным током и напряжением в линии 90° .
2. Разработаны электрические схемы двух типов резонансных систем: с двумя высокочастотными трансформаторами и с высокочастотным трансформатором на входе резонансных систем и диодно-конденсаторным блоком на конце линии у потребителя. Преимущества первого типа резонансной системы заключается в возможности использования высокого напряжения в линии и низкого напряжения на нагрузке. Преимущества второго типа резонансной системы заключается в простоте настройки и эксплуатации в связи с отсутствием резонансного контура на выходе резонансной системы, однако, для второго типа резонансной системы требуется высоковольтный инвертор.
3. С использованием разработанной методики расчёта резонансной системы электроснабжения определены параметры передающего и приёмного резонансных контуров L, C, R, f с высокочастотными трансформаторами и однопроводниковой линии. Разработан метод настройки двухконтурной резонансной системы электроснабжения с учётом взаимной индукции обмоток высокочастотных трансформаторов. Измерения параметров изготовленных контуров подтвердили соответствие с расчётными данными. Показано, что

потери на излучение при частоте 1 кГц не превышают 8,6% передаваемой мощности при длине линии до 9000 км.

4. Разработаны и изготовлены резонансные высокочастотные трансформаторы электрической мощностью 25 кВт, напряжением 10 кВ, с резонансной частотой 1-25 кГц, которые характеризуются почти в 2 раза меньшими затратами материалов по сравнению с трёхфазными трансформаторами 50 Гц той же мощности.
5. Результаты исследований показали, что комплект оборудования РС-20 позволяет передавать электрическую мощность 20,5 кВт при напряжении на линии 6,8 кВ и частоте 3,4 кГц. Экспериментально подтверждено свойство однопроводниковой линии передавать электрическую энергию без существенных джоулевых потерь на сопротивлении линии. Предельная электрическая плотность тока и предельная удельная электрическая мощность на 1 мм² площади сечения проводника линии резонансной системы превышают параметры линий переменного и постоянного тока.
6. Экспериментально установлено, что свободные концы высоковольтных обмоток трансформаторов имеют нулевой потенциал по отношению к Земле и их соединение с Землёй не изменяет резонансные характеристики линии и её электрические параметры. Однопроводниковая резонансная система ведёт себя как волновод, в котором заземление участков с узлами волны напряжения не влияет на распределение потенциалов, токов, параметров нагрузки. Добротность резонансной системы при частоте 5 кГц в десятки раз выше, чем при частоте 50 Гц, что в условиях резонанса приводит к значительному увеличению напряжения и передаваемой мощности вдоль проводящего канала.
7. Рассмотрены основные области применения резонансной системы: Электропитание сельскохозяйственных потребителей с помощью воздушных и кабельных однопроводниковых линий, передача электрической энергии на мобильные объекты. Экспериментально подтверждена возможность передачи электрической энергии от солнечной батареи мощностью 100 Вт в резонансном режиме по однопроводной линии.

8. Расчёты экономической эффективности показывают быструю генерируемость поступлений прибыли и выгодность для всех потенциальных участников: для создателей данной технологии, для инвесторов и кредиторов, так и для государства. Рентабельность строительства резонансных кабельных линий протяжённостью в 20 км составляет 111% (резонансных воздушных линий -10%). Точка безубыточности при строительстве резонансных кабельных линий протяжённостью в 20 км равняется 7 км (резонансных воздушных линий -15,2 км).

Заключение по п. 1.4:

Основной недостаток резонансной системы электропередачи – малая передаваемая мощность (25 кВт). Поэтому эта система может найти применение в электрообеспечении сельского хозяйства для передачи электрической энергии на мобильные объекты.

1.5 Однопроводная система электропередачи Азово-Черноморского инженерного института

Описание данной системы электропередачи произведено по первоисточникам [16, 17, 42, 45]. Принципиальная схема однопроводной системы электропередачи приведена на рисунке 1.6.

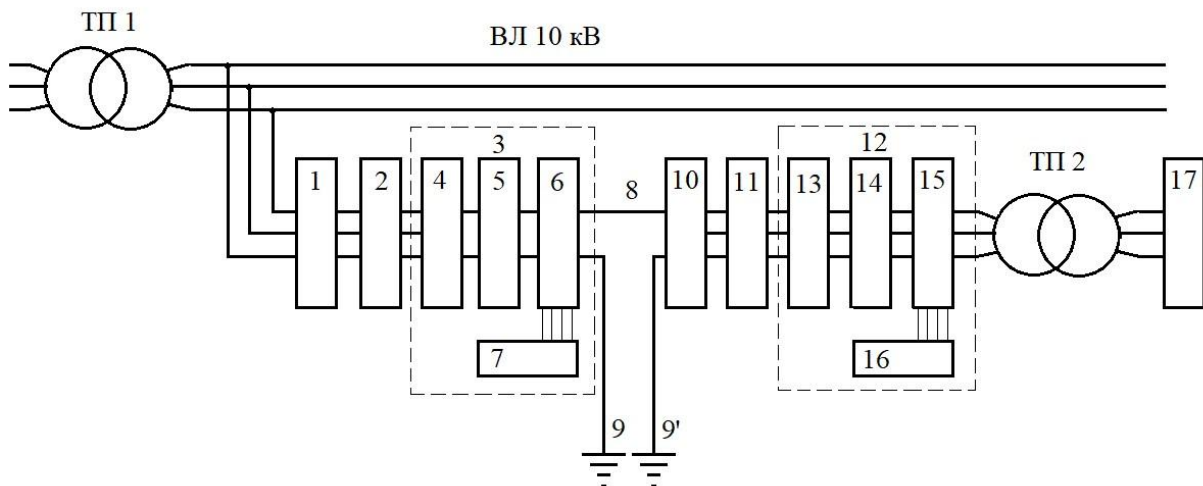


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема однопроводной системы электропередачи [17]

«Принцип работы однопроводной схемы напряжением 10 кВ. Трёхфазное напряжение от источника питания ТП1 в трёхпроводную сеть подаётся на блок 1 –

токоограничивающий реактор и блок 2 – разрядники, служащие для защиты блока 3 – преобразователь трёхфазного напряжения в однофазное от бросков токов и напряжения. Блок 3 включает в себя: блок 4 – силовой трёхфазный выпрямитель, блок 5 – ёмкостной делитель напряжения, блок 6 – семиуровневый инвертор напряжения и блок управления 7 ключами инвертора. Поданное на вход трёхфазного выпрямителя 4 напряжение выпрямляется, сглаживается и делится ёмкостными делителями 5 и поступает в блок инвертора 6, где формируется двухфазное напряжение 10 кВ, промышленной частоты 50 Гц, которое далее, через заземлители 9 и 9' и однопроводную линию 8, через блоки 10 и 11 токоограничивающие реакторы и разрядники, поступает на вход блока 12 – преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное, включающий в себя аналогичные блоки, как и преобразователь 3. Поступившее напряжение на семиуровневый инвертор 15, формируется в трёхфазное (10 кВ частотой 50 Гц) и через понижающий трансформатор ТП2 электроэнергия подаётся потребителю 17.

В качестве преобразователей числа фаз для однопроводной линии предлагается использовать многоуровневые автономные инверторы напряжения (МАИН). Выбор количества уровней инвертора будет зависеть от значения коммутируемого напряжения и от качества выходного напряжения» [17].

В первоисточниках по однопроводной системе электропередачи нет никаких сведений о теоретических и экспериментальных исследованиях этой системы.

Поэтому возникают следующие вопросы:

1. Что собой представляет многоуровневый автономный инвертор напряжений (МАИН), результаты его исследования?
2. Каким образом авторы этой системы добились высокого качества электрической энергии при использовании земли в качестве одного провода? В работах В.А. Терехина и других авторов, применявших системы ОПЗ и ДПЗ, качество электроэнергии в них очень низкое.
3. Какие показатели качества электроэнергии, кроме высших гармонических, измеряли авторы рассматриваемой системы?

4. Что собой представляет экспериментальная установка по исследованию однопроводной системы электропередачи. Какой измерительный комплекс при этом использовался?

Без ответа на эти вопросы и многие другие вопросы нельзя рекомендовать однопроводную систему электропередачи для электроснабжения сельского хозяйства.

1.6 Двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз

1.6.1 История разработки трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ)

В 50-60 годах XX столетия в сельском хозяйстве России получили широкое развитие однофазные электрические сети в виде ответвлений одной фазы и нулевого провода от магистральной четырехпроводной линии 0,38 кВ. Строительство таких двухпроводных линий на деревянных опорах для подвода электроэнергии к жилым посёлкам, к молотильным токам и другим сельскохозяйственным объектам, являлось более простым и дешёвым решением вопроса электроснабжения потребителей. Таким простым способом решалась проблема электрического освещения объектов. Но во многих случаях кроме освещения, требовалось применение электродвигателей для привода молотильного агрегата и других зернообрабатывающих машин и механизмов. Промышленность производила только трёхфазные электродвигатели – наиболее простые и надёжные в эксплуатации устройства.

Возникла проблема преобразования однофазного тока в трёхфазную систему токов. Эта проблема была поставлена перед научно-исследовательскими и учебными заведениями страны. В частности, в Ленинградском сельскохозяйственном институте к решению этой проблемы была подключена кафедра теоретической и общей электротехники под руководством заведующего кафедрой профессора Павла Владимировича Стального. Он поручил в 1960 году разработку статического преобразователя однофазного напряжения в трёхфазное молодому инженеру – ассистенту кафедры Ф.Д. Косоухову. Изучая литературу и авторские свидетельства на изобретение по этой проблеме, он обратил внимание на книгу А.М. Бамдаса, В.А. Кулинича, С.В. Шапиро. Статические электромагнитные преобразователи ча-

стоты и числа фаз [3] и патент Франции №1350762 [82]. Книга [3] 1961 г. издания была первой в России по этой проблеме. В ней были изложены основные разработки, сделанные по электромагнитным преобразователям числа фаз в нашей стране. Патент Франции [82] посвящён трансформаторному преобразователю числа фаз. Изучив материалы книги [3], патенты [12, 57, 76, 77, 82] и другие источники, Ф. Д. Косоухов решил заняться исследованием и разработкой трансформаторных преобразователей числа фаз.

В результате экспериментального исследования трансформаторного преобразователя однофазного напряжения в трёхфазное, Ф. Д. Косоухов установил, что преобразование числа фаз с одной конденсаторной батареей невозможно. Поэтому исследовал ТПЧФ с двумя фазообразующими элементами: с конденсаторной батареей и катушкой индуктивности, включённой параллельно к одной из первичных обмоток трансформатора (рисунок 1.7).

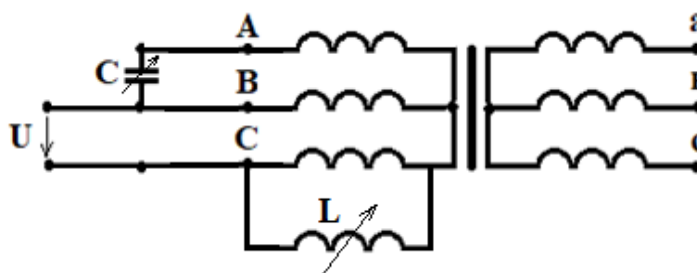


Рисунок 1.7 – Схема ТПЧФ с двумя фазообразующими элементами

При этом он установил, что ТПЧФ с двумя элементами обеспечивает преобразование однофазного напряжения в трёхфазное в определённом диапазоне изменения трёхфазной нагрузки и её коэффициента мощности.

В процессе дальнейших исследований Ф. Д. Косоухов разработал ТПЧФ, состоящий из трёхфазного трансформатора с комбинированным соединением витков первичных обмоток и конденсаторной батареи (рисунок 1.8).

В нём часть витков первичных обмоток соединена звездой (w_A, w_B, w_C), а часть треугольником (w_{AB}, w_{BC}, w_{CA}). Исследование и расчёт такого трансформатора, предложенного для получения промежуточных ступеней регулирования напряжения, произведены доцентом ЛСХИ С. Ф. Симановским.

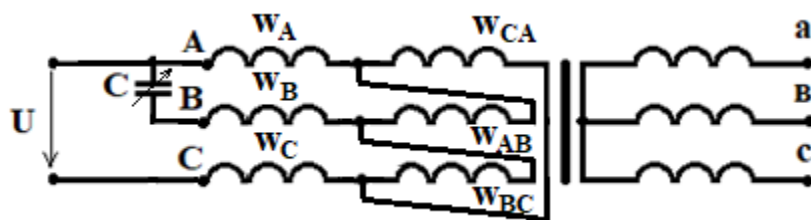


Рисунок 1.8 – Схема ТПЧФ с комбинированным соединением первичных обмоток трансформатора [25]

В результате экспериментального исследования ТПЧФ (рисунок 1.8) установлено, что наилучшие показатели по преобразованию однофазного напряжения в трёхфазное обеспечивает схема с несимметричной по числу витков «звездой» и симметричным «треугольником» со следующими данными: $w_A = 184$, $w_B = w_C = 92$, $w_{AB} = w_{BC} = w_{CA} = 50$.

Для этой схемы в рабочем диапазоне нагрузок при $\cos \varphi = 0,866$ максимальное значение коэффициента $K_{2U} = 5\%$. При $\cos \varphi = 0,766$ и нагрузке, близкой к номинальной $K_{2U} = 4,68\%$; Этот ТПЧФ не пригоден для работы при активной нагрузке, так как K_{2U} достигает 30% [25].

Экспериментально установлено, что оптимальный режим преобразования с изменением нагрузки достигается изменением величины ёмкости конденсаторной батареи ТПЧФ. Зависимость ёмкости от активной мощности приёмника носит прямолинейный характер.

Результаты исследования ТПЧФ (рисунок 1.8) изложены в кандидатской диссертации Ф.Д. Косоухова [25].

Дальнейшие исследования ТПЧФ продолжил преподаватель кафедры ТОЭ ЛСХИ Б.А. Морозов. Он исследовал схему ТПЧФ с последовательным соединением первичных обмоток трансформатора (патент Франции [82]) и конденсаторной батареей с регулируемой ёмкостью, подключённой к зажимам АВ первичной обмотки (рисунок 1.9).

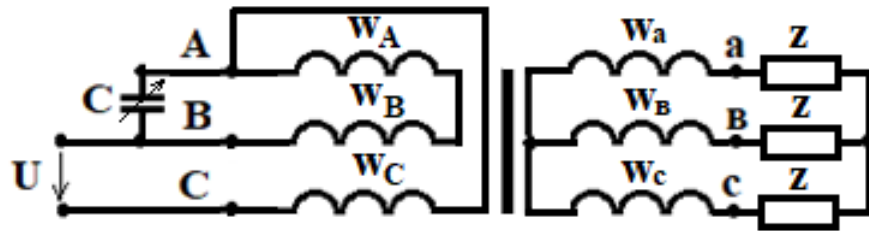


Рисунок 1.9 – Схема ТПЧФ с конденсаторной батареей и различным числом витков первичной обмотки: $w_A = w_B, w_C \neq w_A$

При этом, обмотки фаз А и В соединены последовательно встречно, а обмотка фазы С – согласно с обмотками А, В.

В результате теоретических и экспериментальных исследований ТПЧФ (рисунок 1.9) Б.А. Морозов установил, что для получения симметричной системы напряжений на выходе ТПЧФ с изменением нагрузки надо изменять величину ёмкости и число витков обмотки фазы С. Результаты этих исследований опубликованы в статьях [30, 60, 61].

Дальнейшие исследования ТПЧФ продолжены применительно к преобразователю с одинаковыми по числу витков обмотками трансформатора и двумя конденсаторными батареями C_1 и C_2 (рисунок 1.10). Конденсаторная батарея C_2 в этой схеме включена параллельно первичной обмотки фазы С.

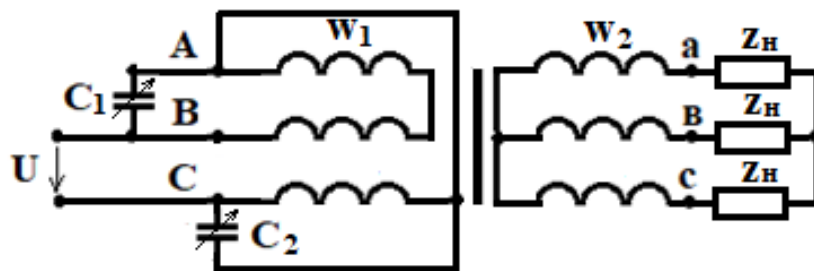


Рисунок 1.10 – Схема ТПЧФ с двумя конденсаторными батареями [29]

Теоретически и экспериментально установлены зависимости ёмкостей C_1 и C_2 от активной мощности нагрузки при различных значениях $\cos \varphi$ [24], создающих симметричную систему напряжений на выходе ТПЧФ.

Результаты исследований ТПЧФ Б.А. Морозова представлены в кандидатской диссертации [29].

Соискателем кафедры ТОЭ ЛСХИ Богданом Тимофеевичем Пославским разработан трансформаторный преобразователь числа фаз с вращающимся магнитным полем [49], выполненным в виде трёхфазного асинхронного двигателя с фазным заторможенным ротором.

«Принцип работы преобразователя однофазного тока в трёхфазный (рисунок 1.11) заключается в следующем. Известно, что однофазное напряжение \underline{U} можно представить в виде суммы симметричных составляющих напряжений прямой \underline{U}_1 и обратной \underline{U}_2 последовательностей (составляющая нулевой последовательности \underline{U}_0 при соединении обмоток статора в звезду отсутствует). Если вращающимся магнитным полем ротора скомпенсировать составляющую напряжения обратной последовательности, то на зажимах A_1, B_1, C_1 обмотки статора 1 образуется симметричная трехфазная система напряжений прямой последовательности.

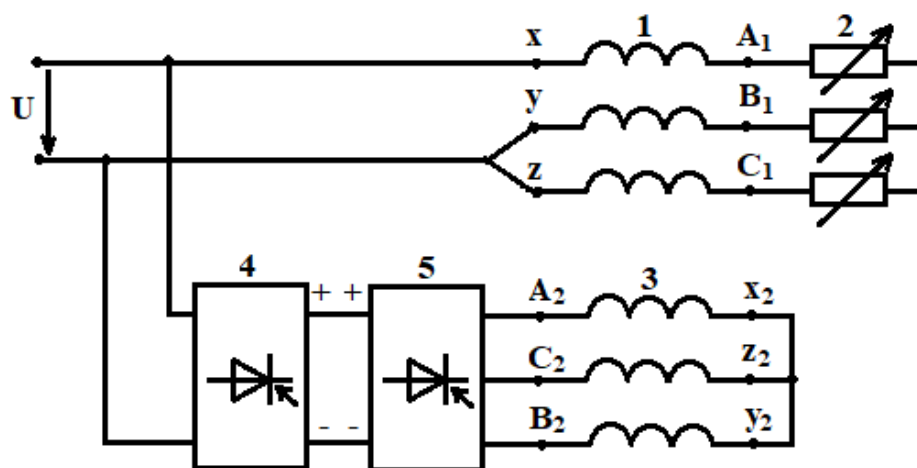


Рисунок 1.11 – Схема ТПЧФ с вращающимся магнитным полем [49]

Для автоматического поддержания симметрии напряжений на выходе преобразователя с изменением однофазного напряжения U и создания трёхфазной системы напряжений на зажимах обмотки ротора 3 A_2, C_2, B_2 служит управляемый выпрямитель 4 – инвертор 5. В схеме (рисунок 1.11) с помощью выпрямителя – инвертора регулируется напряжение на зажимах обмотки ротора U_p только по величине при неизменной его начальной фазе» [49].

1.6.2 О разработках трансформаторных симметрирующих устройств

В 70-80-х годах XX столетия в электрических сетях 0,38 кВ однофазные нагрузки стали оказывать заметное влияние на несимметрию токов в этих сетях и качество напряжения у потребителей электрической энергии. ГОСТ 13109-87 на качество электроэнергии [6] установил предельно допустимые значения на коэффициенты обратной и нулевой последовательности напряжений в трёхфазных сетях 0,38 кВ. Необходимо было решать проблему повышения качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ, и в том числе, в сетях сельскохозяйственного назначения. Научные кадры и преподавательский состав факультета электрификации с.х. ЛСХИ в 80-х годах были переориентированы на решение проблемы качества электроэнергии в сетях 0,38 кВ. Первый аспирант кафедры ТОЭ ЛСХИ Коваленко П. В. под руководством доцента Ф.Д. Косоухова начал разработку и исследование трансформаторных симметрирующих устройств (ТСУ) для снижения несимметрии в сельских сетях [15], защитивший диссертацию по этой теме в 1983 году [14].

В 1979 г. Ф.Д. Косоухов получил авторское свидетельство №658654, Симметрирующее устройство [1], в котором опубликованы две схемы трансформаторного симметрирующего устройства с последовательным соединением вторичных обмоток трансформатора (рисунок 1.12) и двумя фазообразующими конденсаторными батареями C_1 и C_2 . В обеих схемах C_1 подключена параллельно нагрузке (Z_H), а C_2 – на рисунке 1.12, а) – включена последовательно с обмоткой фазы С, а на рисунке 1.12, в) – параллельно к той же обмотке.

Первичные обмотки на рисунке 1.12 соединены в звезду, а вторичные обмотки соединены так же, как в патенте Франции [82]: обмотки фаз А и В – последовательно и встречно, а обмотка фазы С – последовательно и согласно с обмотками фаз А и В. С изменением величины нагрузки и её $\cos \varphi$ для поддержания симметрии в первичной цепи необходимо регулировать ёмкости обеих конденсаторных батарей.

Результаты теоретических исследований трансформаторных симметрирующих устройств Ф.Д. Косоухов опубликовал в своей докторской диссертации, защищённой в 1991 году [21], монографии [22] и многих научных статьях.

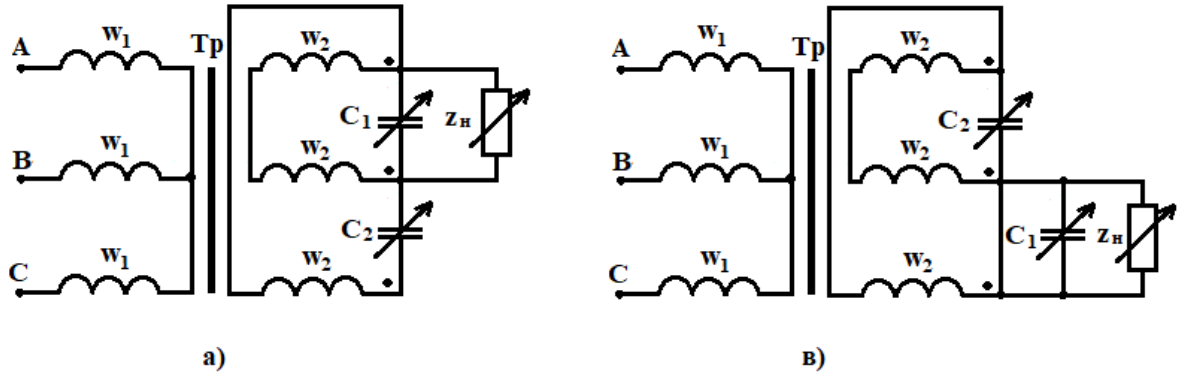


Рисунок 1.12 – Схемы трансформаторных симметрирующих устройств: а) с последовательным соединением C_2 с обмоткой фазы C; в) с параллельным соединением C_2 с той же обмоткой [1]

Проблеме симметрирования напряжений и токов в электрических сетях 0,38 кВ с помощью трансформаторных симметрирующих устройств посвящены так же работы [73, 74].

Результаты экспериментального исследования ТСУ посвящены статьи [70, 71] и кандидатская диссертация Филиппова А. О. [68].

1.6.3 Разработка двухпроводной системы электропередачи с ТПЧФ

Имеющийся опыт на кафедре ТОЭ ЛСХИ (Электротехники и электроснабжения СПбГАУ) по разработке ТПЧФ и ТСУ был применён доктором технических наук профессором Ф. Д. Косоуховым и аспирантами А. О. Филипповым, Н. В. Васильевым и А. Л. Боршниним для создания двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения сельского хозяйства.

К 2010 году на кафедре были разработаны трансформаторные симметрирующие устройства, преобразующие трёхфазный ток в однофазный. Эти ТСУ в дальнейшем будем называть ТПЧФ-1 в двухпроводной системе электропередачи на базе повышающего трансформатора.

Трансформаторные преобразователи однофазного тока в трёхфазный, называемые ранее ТПЧФ, в двухпроводной системе электропередачи будем называть ТПЧФ-2 на базе понижающего трансформатора.

Фазопреобразующими элементами в двухпроводной системе электропередачи с ТПЧФ являются трёхфазный трансформатор обычной конструкции и две конденсаторные батареи (рисунок 1.13).

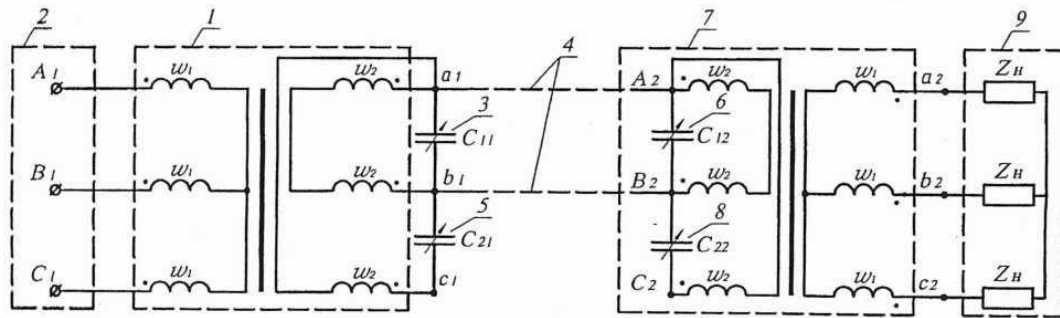


Рисунок 1.13 – Схема двухпроводной системы электропередачи с ТПЧФ и конденсаторами на высокой стороне трансформаторов [46]

На устройство передачи электрической энергии трёхфазного тока по двухпроводной линии нами получен патент на изобретение №2532534 [46].

ТПЧФ-1 (1) содержит трёхфазный повышающий трансформатор и две конденсаторные батареи C_{11} и C_{21} . Первичные обмотки w_1 трансформатора соединены звездой и подключены к питающей сети 2, а вторичные обмотки w_2 соединены последовательно: обмотка фазы a_1 соединена с обмоткой фазы b_1 последовательно встречно, а с обмоткой фазы c_1 последовательно согласно. Конденсаторная батарея C_{11} подключена к выходным зажимам $a_1 b_1$ трансформатора, к этим зажимам подключена двухпроводная линия 4. Батарея C_{21} соединена последовательно с обмоткой фазы c_1 трансформатора, второй конец которой подключен к зажиму b_1 трансформатора (линии).

ТПЧФ-2 (7) содержит трёхфазный понижающий трансформатор, первичные обмотки w_2 которого и конденсаторные батареи C_{12} и C_{22} соединены по той же схеме, что и вторичные обмотки ТПЧФ-1. К входным зажимам $A_2 B_2$ подсоединена линия электропередачи 4. Вторичные обмотки трансформатора w_1 соединены в звезду, а выходные зажимы $a_2 b_2 c_2$ подключены к трехфазному приемнику 9.

Предыдущие исследования трансформаторных преобразователей числа фаз [21, 68] показали, что при изменении нагрузки преобразование трёхфазного тока в однофазный и однофазного в трёхфазный возможно при регулировании ёмкостей конденсаторных батарей C_{11} , C_{21} в ТПЧФ-1 и C_{12} , C_{22} в ТПЧФ-2 (рисунок 1.13).

«Расчётные формулы для ёмкостей конденсаторных батарей ТПЧФ-1 имеют следующий вид: $C_{11} = \frac{2I_H \sin(\varphi_H - 30^\circ)}{\sqrt{3}\omega U}$; $C_{21} = \frac{\sqrt{3}I_H \cos \varphi_H}{2\omega U}$,

где I_H – однофазный ток линии;

$\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности однофазной нагрузки;

ω – угловая частота тока;

U – напряжение линии электропередачи.

Чтобы выразить ёмкости в относительных единицах, необходимо принять за базисную ёмкость величину $C_6 = \frac{I_H(\text{ном})}{\omega U}$. Тогда ёмкости в относительных единицах:

$$C_{11}^* = \frac{C_{11}}{C_6} = \frac{2I_H \sin(\varphi_H - 30^\circ)}{\sqrt{3}I_H(\text{ном})}; C_{21}^* = \frac{C_{21}}{C_6} = \frac{\sqrt{3}I_H \cos \varphi_H}{2I_H(\text{ном})},$$

где $I_H(\text{ном})$ – номинальный однофазный ток линии;

$$I_H^* = \frac{I_H}{I_H(\text{ном})} \text{ – относительное значение однофазного тока} \text{ [46].}$$

На рисунке 1.14 показаны зависимости ёмкостей фазообразующих конденсаторных батарей ТПЧФ-1.

Учитывая, что массовое производство конденсаторных батарей в России осуществляется для напряжения до 10 кВ, система электропередачи с ТПЧФ и конденсаторами на высокой стороне трансформаторов пригодна для напряжения до 10 кВ.

Для напряжений 35, 110 кВ нами разработана двухпроводная система электропередачи с ТПЧФ, в которой конденсаторные батареи устанавливаются на низкой стороне трансформаторов (рисунок 1.15). Это устройство передачи электрической энергии трёхфазного тока по двухпроводной линии запатентовано нами тем же патентом №2532534.

Теоретическому и экспериментальному исследованию высоковольтной двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями

трёхфазного тока в однофазный (ТПЧФ-1) и однофазного тока в трёхфазный (ТПЧФ-2) с конденсаторами на низкой стороне трансформаторов посвящена данная диссертационная работа.

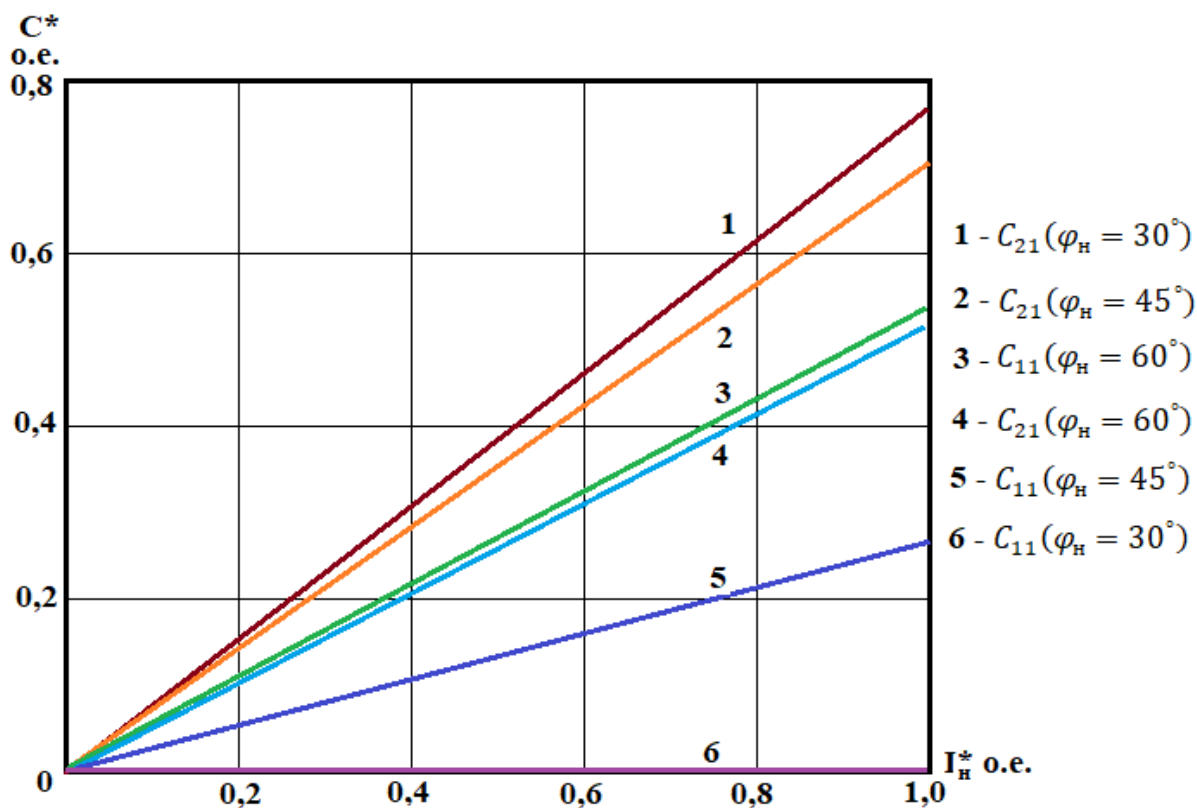


Рисунок 1.14 – Зависимости ёмкостей фазопреобразующих конденсаторных батарей ТПЧФ-1 [46]

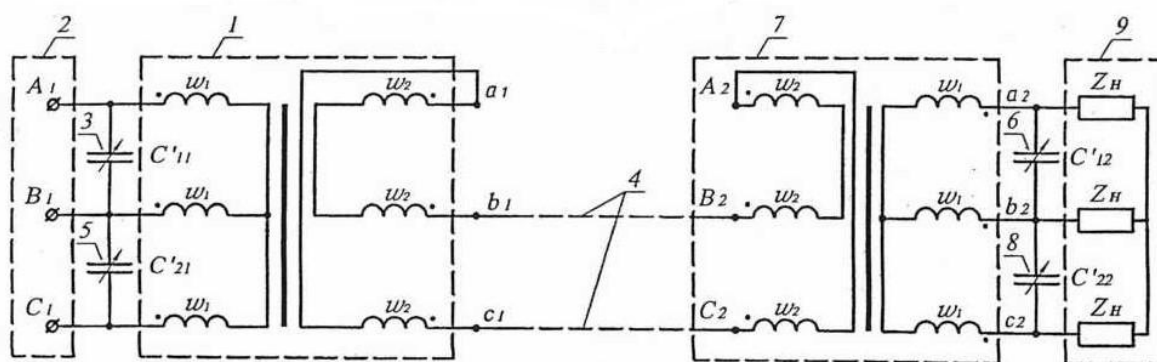


Рисунок 1.15 – Схема двухпроводной системы электропередачи с ТПЧФ и конденсаторами на низкой стороне трансформаторов [46]

1.7 Выводы по первой главе

1. Из истории разработки трансформаторных преобразователей числа фаз следует, что основоположником этих разработок 1960 – 1980 гг. на кафедре

Теоретической и общей электротехники ЛСХИ является преподаватель Ф. Д. Косоухов. Определённый вклад в эти разработки сделали преподаватели и аспиранты Б. А. Морозов, Б. Т. Пославский, П. В. Коваленко, А. О. Филиппов и А. Л. Борошнин.

2. В результате рассмотрения неполнофазных электроэнергетических систем сделан вывод о том, что система электропередачи, разработанная в СПбГАУ и защищённая патентом № 2532534 выполнена на базе типовых электротехнических устройств, простая по конструкции, а следовательно, надёжная в эксплуатации. Данная двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз может быть рекомендована для транспортировки электрической энергии от отдельных генерирующих мощностей к сельскохозяйственным потребителям. Принято решение провести полные теоретические и экспериментальные исследования этой системы.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ТПЧФ-1

2.1 Схема двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз

На кафедре Электроэнергетики и электрооборудования СПбГАУ нами разработана схема двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз, в которых конденсаторные батареи включены на низкой стороне трансформаторов (рисунок 2.1). Она отличается от схемы двухпроводной системы электропередачи с ТПЧФ (рисунок 1.15), входящей в патент №2532534, тем, что одна из конденсаторных батарей включена на междуфазное напряжение U_{ac} вместо U_{bc} . Как показали теоретические и экспериментальные исследования ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2, такое включение конденсаторов обеспечивает более широкий диапазон $\cos \varphi_H$ нагрузки при преобразовании трёхфазного тока в однофазный и однофазного тока в трёхфазный.

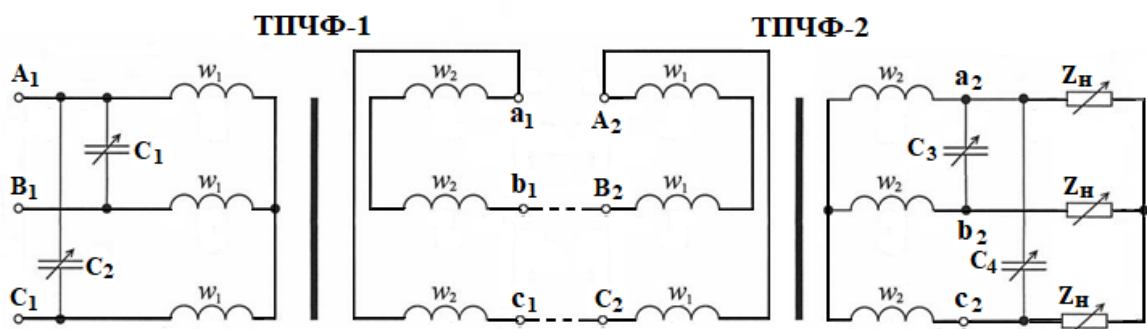


Рисунок 2.1 – Схема двухпроводной системы электропередачи с ТПЧФ и конденсаторами на низкой стороне трансформаторов (исследуемый вариант) [20]

2.2 Анализ трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1 с конденсаторами на низкой стороне трансформатора

2.2.1 Цель и задачи анализа ТПЧФ-1

Метод анализа ТПЧФ разработан Косоуховым Ф.Д. в докторской диссертации [21] и опубликован в научных статьях [18, 19]. Метод анализа ТПЧФ-1 с конденсаторами на низкой стороне трансформатора разработан совместно с Косоуховым Ф.Д. и опубликован в статье [8]. Автором лично была сформулирована проблема и поставлена задача, а также произведено большинство расчётов,

представленных в настоящей главе. Научный руководитель Косоухов Ф. Д. осуществлял организацию и координацию научных исследований по данному направлению. Другие соавторы статьи [8] осуществляли проверку и корректировку полученных результатов, а также производили всю необходимую работу для опубликования статьи [8].

Целью анализа ТПЧФ-1 является установление принципиальной возможности преобразования трёхфазного тока в однофазный с помощью повышающего трёхфазного трансформатора и двух конденсаторных батарей на низкой стороне трансформатора.

К задачам анализа ТПЧФ-1 относятся:

1. Установление зависимостей изменения ёмкостей конденсаторных батарей ТПЧФ-1 от величины тока и коэффициента мощности однофазной нагрузки.
2. Определение зависимости токов и напряжений первичных и вторичных обмоток трансформатора и симметрирующих конденсаторов от тока нагрузки.
3. Определение зависимости мощностей трансформатора и симметрирующих конденсаторов от мощности однофазной нагрузки.

2.2.2 Допущения принятые при анализе ТПЧФ-1

Схема ТПЧФ-1 представлена на рисунке 2.2.

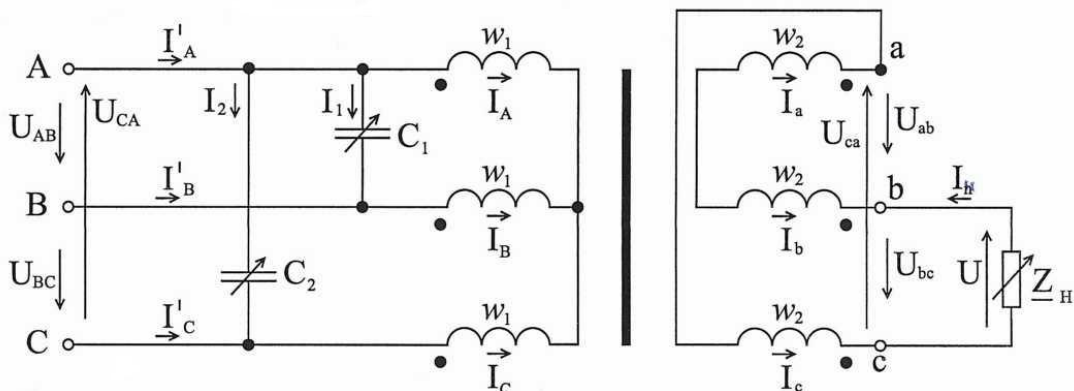


Рисунок 2.2 – Схема ТПЧФ-1 [20]

1. Трансформатор ТПЧФ-1 (рисунок 2.2) принимаем совершенным [27], поэтому при любой нагрузке его комплексный коэффициент трансформации по напряжению:

$$\underline{n} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_a} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{U}_b} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{U}_c} = ne^{j180^\circ} = -n, \quad (2.1)$$

где $n = \frac{w_1}{w_2}$;

w_1 – число витков первичной обмотки ТПЧФ-1;

w_2 – число витков вторичной обмотки ТПЧФ-1;

$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – комплексы фазных напряжений первичной обмотки ТПЧФ - 1;

$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – комплексы фазных напряжений вторичной обмотки ТПЧФ - 1.

2. Потерями в конденсаторных батареях пренебрегаем, то есть комплексные сопротивления конденсаторных батарей:

$$\underline{Z}_1 = -jx_1 = x_1 e^{-j90^\circ}; \quad (2.2)$$

где x_1 – ёмкостное сопротивление первой конденсаторной батареи.

$$\underline{Z}_2 = -jx_2 = x_2 e^{-j90^\circ}. \quad (2.3)$$

где x_2 – ёмкостное сопротивление второй конденсаторной батареи.

3. Однофазная нагрузка (линия электропередачи) имеет индуктивный характер, т.е.:

$$\underline{Z}_H = R_H + jx_H = Z_H e^{j\varphi_H}. \quad (2.4)$$

где R_H – резистивное сопротивление однофазной нагрузки;

x_H – реактивное сопротивление однофазной нагрузки;

Z_H – модуль полного сопротивления однофазной нагрузки.

4. Трёхфазная система напряжений на входе трансформатора симметрична.

Направив по вещественной оси вектор фазного напряжения $\underline{U}_A = \underline{U}_\phi$, запишем комплексы фазных напряжений первичной обмотки трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= U_\phi; \\ \underline{U}_B &= U_\phi e^{j\frac{4\pi}{3}} = \underline{a}^2 U_\phi; \\ \underline{U}_C &= U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}} = \underline{a} U_\phi. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ – вектор поворота на 120° .

2.2.3 Уравнения для ТПЧФ-1

Задаёмся направлениями токов во всех ветвях схемы (рисунок 2.2), приняв направления напряжений совпадающими с соответствующими токами, составляем уравнения в комплексной форме.

На основании закона равновесия МДС вдоль замкнутого контура трансформатора составляем два уравнения [27]:

$$\underline{I}_A w_1 + \underline{I}_a w_2 - \underline{I}_B w_2 - \underline{I}_B w_1 = 0; \quad (2.6)$$

где \underline{I}_A – комплексное значение тока в фазе А первичной обмотки ТПЧФ-1;

\underline{I}_a – комплексное значение тока в фазе А вторичной обмотки ТПЧФ-1;

\underline{I}_B – комплексное значение тока в фазе В первичной обмотки ТПЧФ-1;

\underline{I}_b – комплексное значение тока в фазе В вторичной обмотки ТПЧФ-1.

$$\underline{I}_B w_1 + \underline{I}_b w_2 - \underline{I}_C w_2 - \underline{I}_C w_1 = 0. \quad (2.7)$$

\underline{I}_C – комплексное значение тока в фазе С первичной обмотки ТПЧФ-1;

\underline{I}_c – комплексное значение тока в фазе С вторичной обмотки ТПЧФ-1.

Остальные уравнения составляем по законам Кирхгофа [31]:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0; \quad (2.8)$$

$$\underline{I}'_A - \underline{I}_A - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0; \quad (2.9)$$

где \underline{I}'_A – комплексное значение тока фазы А на входе ТПЧФ-1;

$\underline{I}_1, \underline{I}_2$ – комплексные токи конденсаторных батарей С₁ и С₂ соответственно.

$$\underline{I}'_B - \underline{I}_B + \underline{I}_1 = 0; \quad (2.10)$$

где \underline{I}'_B – комплексное значение тока фазы В на входе ТПЧФ-1.

$$\underline{I}'_C - \underline{I}_C + \underline{I}_2 = 0; \quad (2.11)$$

где \underline{I}'_C – комплексное значение тока фазы С на входе ТПЧФ-1.

$$\underline{U}_c + \underline{U} - \underline{U}_b + \underline{U}_a = 0; \quad (2.12)$$

где \underline{U} – комплексное значение напряжения на нагрузке.

$$\underline{I}_a = \underline{I}_c = \underline{I}_H; \quad (2.13)$$

где \underline{I}_H – комплексное значение тока однофазной нагрузки.

$$\underline{I}_a = -\underline{I}_b; \quad (2.14)$$

$$\underline{U} = \underline{I}_H \underline{Z}_H; \quad (2.15)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = \underline{U}_{AB}; \quad (2.16)$$

где \underline{U}_1 – комплексное значение напряжения на первой конденсаторной батарее.

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = -\underline{U}_{CA}; \quad (2.17)$$

где \underline{U}_2 – комплексное значение напряжения на второй конденсаторной батарее.

2.2.4 Решение уравнений ТПЧФ-1

Делим (2.6), (2.7) на w_2 :

$$\underline{I}_A n + \underline{I}_a - \underline{I}_b - \underline{I}_B n = 0; \quad (2.18)$$

$$\underline{I}_B n + \underline{I}_b - \underline{I}_c - \underline{I}_C n = 0. \quad (2.19)$$

Из уравнений (2.9) – (2.11):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}'_A - \underline{I}_1 - \underline{I}_2; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}'_B + \underline{I}_1; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}'_C + \underline{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

На основании (2.8), (2.20) имеем:

$$\underline{I}'_A + \underline{I}'_B + \underline{I}'_C = 0; \quad (2.21)$$

Подставляем (2.20) в (2.18), (2.19):

$$(\underline{I}_A - \underline{I}_B)n = \underline{I}_b - \underline{I}_a = -\underline{I}_a - \underline{I}_a = -2\underline{I}_a; \quad (2.22)$$

$$(\underline{I}'_A - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}'_B - \underline{I}_1)n = -2\underline{I}_a; \quad (2.23)$$

$$(\underline{I}'_A - \underline{I}'_B - 2\underline{I}_1 - \underline{I}_2)n = -2\underline{I}_a; \quad (2.24)$$

$$(\underline{I}_B - \underline{I}_C)n = \underline{I}_c - \underline{I}_b = \underline{I}_a + \underline{I}_a = 2\underline{I}_a; \quad (2.25)$$

$$(\underline{I}'_B + \underline{I}_1 - \underline{I}'_C - \underline{I}_2)n = 2\underline{I}_a. \quad (2.26)$$

Определим I_a с учетом (2.1), (2.5), (2.12), (2.15):

$$\begin{aligned} I_a = I_H &= \frac{U}{Z_H} = \frac{1}{Z_H} (U_B - U_a - U_c) = \frac{1}{Z_H} \left(\frac{U_B}{n} - \frac{U_a}{n} - \frac{U_c}{n} \right) = \\ &= \frac{1}{Z_H n} (U_\phi \underline{a}^2 - U_\phi - U_\phi \underline{a}) = \frac{U_\phi}{Z_H n} (\underline{a}^2 - \underline{a} - 1) = \frac{2\underline{a}^2 U_\phi}{Z_H n} = -\frac{2\underline{a}^2 U_\phi}{n Z_H}; \end{aligned} \quad (2.27)$$

так как $\underline{a}^2 - \underline{a} - 1 = 2\underline{a}^2$.

Определим I_1 и I_2 с учетом (2.16), (2.17):

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_{AB}}{Z_1} = \frac{U_A - U_B}{Z_1} = \frac{U_\phi - \underline{a}^2 U_\phi}{Z_1} = \frac{U_\phi (1 - \underline{a}^2)}{Z_1}; \quad (2.28)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{-U_{CA}}{Z_2} = \frac{-U_C + U_A}{Z_2} = \frac{U_\phi - \underline{a} U_\phi}{Z_2} = \frac{U_\phi (1 - \underline{a})}{Z_2}; \quad (2.29)$$

Подставляем (2.27) – (2.29) в (2.22)-(2.26):

$$\left[I'_A - I'_B - \frac{2U_\phi (1 - \underline{a}^2)}{Z_1} - \frac{U_\phi (1 - \underline{a})}{Z_2} \right] n = \frac{4\underline{a}^2 U_\phi}{n Z_H}; \quad (2.30)$$

$$n(I'_A - I'_B) = \frac{4\underline{a}^2 U_\phi}{n Z_H} + \frac{2U_\phi (1 - \underline{a}^2)n}{Z_1} + \frac{U_\phi (1 - \underline{a})n}{Z_2}; \quad (2.31)$$

$$I'_A - I'_B = U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2 Z_H} + \frac{2(1 - \underline{a}^2)}{Z_1} + \frac{1 - \underline{a}}{Z_2} \right]; \quad (2.32)$$

$$\left[I'_B - I'_C + \frac{U_\phi (1 - \underline{a}^2)}{Z_1} - \frac{U_\phi (1 - \underline{a})}{Z_2} \right] n = -\frac{4\underline{a}^2 U_\phi}{n Z_H}; \quad (2.33)$$

$$n(I'_B - I'_C) = -\frac{4\underline{a}^2 U_\phi}{n Z_H} - \frac{U_\phi (1 - \underline{a}^2)n}{Z_1} + \frac{U_\phi (1 - \underline{a})n}{Z_2}; \quad (2.34)$$

$$I'_B - I'_C = U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2 Z_H} - \frac{1 - \underline{a}^2}{Z_1} + \frac{1 - \underline{a}}{Z_2} \right]; \quad (2.35)$$

Запишем систему уравнений (2.21), (2.30) - (2.35):

$$\left. \begin{aligned} I'_A + I'_B + I'_C &= 0; \\ I'_A - I'_B + 0 &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2 Z_H} + \frac{2(1 - \underline{a}^2)}{Z_1} + \frac{1 - \underline{a}}{Z_2} \right]; \\ 0 + I'_B - I'_C &= U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2 Z_H} - \frac{1 - \underline{a}^2}{Z_1} + \frac{1 - \underline{a}}{Z_2} \right]. \end{aligned} \right\}; \quad (2.36)$$

Решаем систему уравнений (2.36) матричным методом [28]:

$$[\underline{C}][\underline{I}] = [\underline{D}]; \quad (2.37)$$

где $[\underline{C}]$ – матрица системы уравнений (2.36):

$$[\underline{C}] = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}; \quad (2.38)$$

Искомый вектор тока:

$$[\underline{I}] = \begin{vmatrix} \underline{I}'_A \\ \underline{I}'_B \\ \underline{I}'_C \end{vmatrix}; \quad (2.39)$$

Задающий вектор:

$$[\underline{D}] = \begin{vmatrix} 0 \\ U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} + \frac{2(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \\ U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \end{vmatrix}; \quad (2.40)$$

Искомый вектор тока $[\underline{I}]$ первичной цепи ТПЧФ-1 определим как произведение обратной матрицы $[\underline{C}]^{-1}$ на задающий вектор $[\underline{D}]$, т.е.:

$$[\underline{I}] = [\underline{C}]^{-1}[\underline{D}]; \quad (2.41)$$

Определяем обратную матрицу:

$$[\underline{C}]^{-1} = \frac{1}{\underline{\Delta}} \begin{vmatrix} \underline{\Delta}_{11} & \underline{\Delta}_{21} & \underline{\Delta}_{31} \\ \underline{\Delta}_{12} & \underline{\Delta}_{22} & \underline{\Delta}_{32} \\ \underline{\Delta}_{13} & \underline{\Delta}_{23} & \underline{\Delta}_{33} \end{vmatrix}; \quad (2.42)$$

Определитель системы уравнений:

$$\underline{\Delta} = \begin{vmatrix} \underline{\Delta}_{11} & \underline{\Delta}_{21} & \underline{\Delta}_{31} \\ \underline{\Delta}_{12} & \underline{\Delta}_{22} & \underline{\Delta}_{32} \\ \underline{\Delta}_{13} & \underline{\Delta}_{23} & \underline{\Delta}_{33} \end{vmatrix} = -1 - 1 - 1 = -3; \quad (2.43)$$

Алгебраические дополнения: $\underline{\Delta}_{11} = \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -1$; $\underline{\Delta}_{12} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -1$;
 $\underline{\Delta}_{13} = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = -1$; $\underline{\Delta}_{21} = - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = -1 - 1 = -2$; $\underline{\Delta}_{22} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = 1$;
 $\underline{\Delta}_{23} = - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$; $\underline{\Delta}_{31} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} = -1$; $\underline{\Delta}_{32} = - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = -1$;
 $\underline{\Delta}_{33} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = 1 + 1 = 2$.

Обратная матрица в соответствии с (2.42):

$$[\underline{C}]^{-1} = -\frac{1}{3} \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 \end{vmatrix}; \quad (2.44)$$

В соответствии с выражением (2.41) имеем:

$$\begin{vmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} + \frac{2(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \\ U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \end{vmatrix}; \quad (2.45)$$

откуда:

$$\begin{aligned} I'_A &= \frac{1}{3} \left\{ 2U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} + \frac{2(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] + U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{3} U_\phi \left[\frac{8\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} + \frac{4(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} + \frac{2(1-\underline{a})}{\underline{Z}_2} - \frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] = \\ &= \frac{1}{3} U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} + \frac{3(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} + \frac{3(1-\underline{a})}{\underline{Z}_2} \right]; \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$I'_A = U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} + \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right]; \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} I'_B &= \frac{1}{3} U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{2(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} - \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} - \frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] = \\ &= \frac{1}{3} U_\phi \left[-\frac{8\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{3(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} \right]; \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$I'_B = U_\phi \left[-\frac{8\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} \right]; \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} I'_C &= \frac{1}{3} U_\phi \left[-\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{2(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} - \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} + \frac{8\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} + \frac{2(1-\underline{a}^2)}{\underline{Z}_1} - \frac{2(1-\underline{a})}{\underline{Z}_2} \right] = \\ &= \frac{1}{3} U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{n^2\underline{Z}_H} - \frac{3(1-\underline{a})}{\underline{Z}_2} \right]; \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$I'_C = U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right]; \quad (2.51)$$

Проверка правильности выражений (2.46) – (2.51):

$$\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} + \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1 - \underline{a}}{\underline{Z}_2} - \frac{8\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}}{\underline{Z}_2} = 0. \quad (2.52)$$

2.2.5 Определение параметров симметрирующих элементов ТПЧФ-1

В результате решения системы уравнений для ТПЧФ-1 мы получили систему токов на входе ТПЧФ-1 I'_A, I'_B, I'_C :

$$\left. \begin{aligned} I'_A &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} + \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1 - \underline{a}}{\underline{Z}_2} \right]; \\ I'_B &= U_\phi \left[-\frac{8\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} \right]; \\ I'_C &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}}{\underline{Z}_2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

Разложим систему уравнений (2.53) на симметричные составляющие I_{1c}, I_{2c} и I_{3c} , и определим комплексный коэффициент обратной последовательности по току $\underline{K}_{2i} = \frac{I_2}{I_1}$.

Вектор токов в системе симметричных координат [28]:

$$[I_s] = [S]^{-1} [I]; \quad (2.54)$$

где:

$$[I_s] = \begin{Bmatrix} I_{1c} \\ I_{2c} \\ I_{0c} \end{Bmatrix}; \quad (2.55)$$

Матрица, обратная матрице системы симметричных координат:

$$[S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix}; \quad (2.56)$$

На основании (2.54) имеем:

$$\begin{Bmatrix} I_{1c} \\ I_{2c} \\ I_{0c} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix} U_\phi \begin{Bmatrix} \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} + \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1 - \underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \\ \left[-\frac{8\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} \right] \\ \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] \end{Bmatrix}. \quad (2.57)$$

Определим \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 при которых система уравнений (2.36) будет симметричной. С этой целью приравняем коэффициент $\underline{K}_{2i} = 0$ при $\underline{I}_{2c} = 0$, так как ток нулевой последовательности \underline{I}_{0c} в цепи (рисунок 2.2) ТПЧФ-1 отсутствует:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{2c} &= \frac{1}{3} U_\phi \times \\ &\times \left[\frac{4a^2}{3n^2 Z_H} + \frac{(1-a^2)}{Z_1} + \frac{(1-a)}{Z_2} - \frac{8a^4}{3n^2 Z_H} - \frac{a^2(1-a^2)}{Z_1} + \frac{4a^3}{3n^2 Z_H} - \frac{a(1-a)}{Z_2} \right] = \\ &= \frac{1}{3} U_\phi \left\{ \frac{4}{3n^2 Z_H} [a^2 - 2a + 1] + \frac{1}{Z_1} [1 - a^2 - a^2 + a] + \frac{1}{Z_2} [1 - a - a + a^2] \right\} = \\ &= \frac{1}{3} U_\phi \left[\frac{4}{3n^2 Z_H} (a^2 - 2a + 1) + \frac{1}{Z_1} (a - 2a^2 + 1) + \frac{1}{Z_2} (a^2 - 2a + 1) \right]; \quad (2.58) \end{aligned}$$

Учитывая следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} 1 + \underline{a} - 2\underline{a}^2 &= \frac{3}{2} (1 + j\sqrt{3}); \\ 1 - 2\underline{a} + \underline{a}^2 &= \frac{3}{2} (1 - j\sqrt{3}); \\ \underline{a}^2 - 1 &= -\frac{3}{2} (\sqrt{3} + j). \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

продолжим определение тока обратной последовательности (2.58):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{2c} &= \frac{1}{3} U_\phi \left[\frac{2 \cdot 3}{3n^2 Z_H} (1 - j\sqrt{3}) + \frac{1}{Z_1} \frac{3}{2} (1 + j\sqrt{3}) + \frac{1}{Z_2} \frac{3}{2} (1 - j\sqrt{3}) \right] = \\ &= U_\phi \left[\frac{2}{3n^2 Z_H} (1 - j\sqrt{3}) + \frac{1}{2Z_1} (1 + j\sqrt{3}) + \frac{1}{2Z_2} (1 - j\sqrt{3}) \right] = \\ &= U_\phi \left[\frac{2 - j\sqrt{3} \cdot 2}{3n^2 Z_H} + \frac{1 + j\sqrt{3}}{2Z_1} + \frac{1 - j\sqrt{3}}{2Z_2} \right]; \quad (2.60) \end{aligned}$$

Приравняем квадратную скобку [] к нулю $\underline{I}_{2c} = 0$:

$$\left[\frac{2 - j\sqrt{3} \cdot 2}{3n^2 Z_H} + \frac{1 + j\sqrt{3}}{2Z_1} + \frac{1 - j\sqrt{3}}{2Z_2} \right] = 0; \quad (2.61)$$

Подставим в уравнение (2.61) выражения комплексных сопротивлений симметрирующих элементов и нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= -jx_1 \\ \underline{Z}_2 &= -jx_2 \\ \underline{Z}_H &= R_H + jx_H \end{aligned} \right\}; \quad (2.62)$$

Получим следующие выражения для x_1 и x_2 :

$$x_1 = \frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{8R_H}, \quad (2.63)$$

$$x_2 = \frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{4(R_H + \sqrt{3}x_H)}, \quad (2.64)$$

Выразим (2.63), (2.64) через $Z_H = \sqrt{R_H^2 + x_H^2}$, $R_H = Z_H \cos \varphi$, $x_H = Z_H \sin \varphi$, $Z_H^2 = R_H^2 + x_H^2$:

$$x_1 = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H^2}{8Z_H \cos \varphi} = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{8 \cos \varphi}, \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H^2}{4(Z_H \cos \varphi + Z_H \sqrt{3} \sin \varphi)} = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{4 \cdot 2 \left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right)} = \\ &= \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{8(\sin 30^\circ \cos \varphi + \cos 30^\circ \sin \varphi)} = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{8 \sin(30^\circ + \varphi)}, \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$x_2 = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{8 \sin(30^\circ + \varphi)}. \quad (2.67)$$

Определим ёмкости конденсаторных батарей C_1 и C_2 .

Учитывая, что $x_1 = \frac{1}{\omega C_1}$, $x_2 = \frac{1}{\omega C_2}$, $Z_H = \frac{U}{I}$, где ω – угловая частота, получим из (2.65), (2.66):

$$C_1 = \frac{1}{\omega x_1} = \frac{8 \cos \varphi}{\omega 3\sqrt{3}n^2 Z_H} = \frac{8 I_H \cos \varphi}{3\sqrt{3}n^2 \omega U}, \quad (2.68)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega x_2} = \frac{8 \sin(30^\circ + \varphi)}{\omega 3\sqrt{3}n^2 Z_H} = \frac{8 I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3\sqrt{3}n^2 \omega U}. \quad (2.69)$$

Из выражений (2.68), (2.69) следует, что при изменении угла φ нагрузки в диапазоне от 0° до 90° ($\cos \varphi = 1,0 \dots 0$), оба симметрирующих элемента ТПЧФ-1 имеют ёмкостной характер, т.е. преобразование трёхфазного тока в однофазный осуществляется с помощью ТПЧФ-1 в широком диапазоне изменения нагрузки.

Выразим ёмкости C_1 и C_2 конденсаторных батарей в относительных единицах, приняв за базисную ёмкость $C_6 = \frac{I_{H(\text{НОМ})}}{\omega U n^2}$.

Тогда выражения для ёмкостей в относительных единицах будут иметь следующий вид:

$$C_1^* = \frac{C_1}{C_6} = \frac{8I_H \cos \varphi}{3\sqrt{3}I_H(\text{НОМ})}, \quad (2.70)$$

$$C_2^* = \frac{C_2}{C_6} = \frac{8I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3\sqrt{3}I_H(\text{НОМ})}. \quad (2.71)$$

На рисунках 2.3 – 2.4 по формулам (2.70) – (2.71) построены зависимости ёмкостей C_1 и C_2 ТПЧФ-1 от тока в линии I_H при коэффициенте трансформации $n = 1$ и различных значениях угла φ нагрузки.

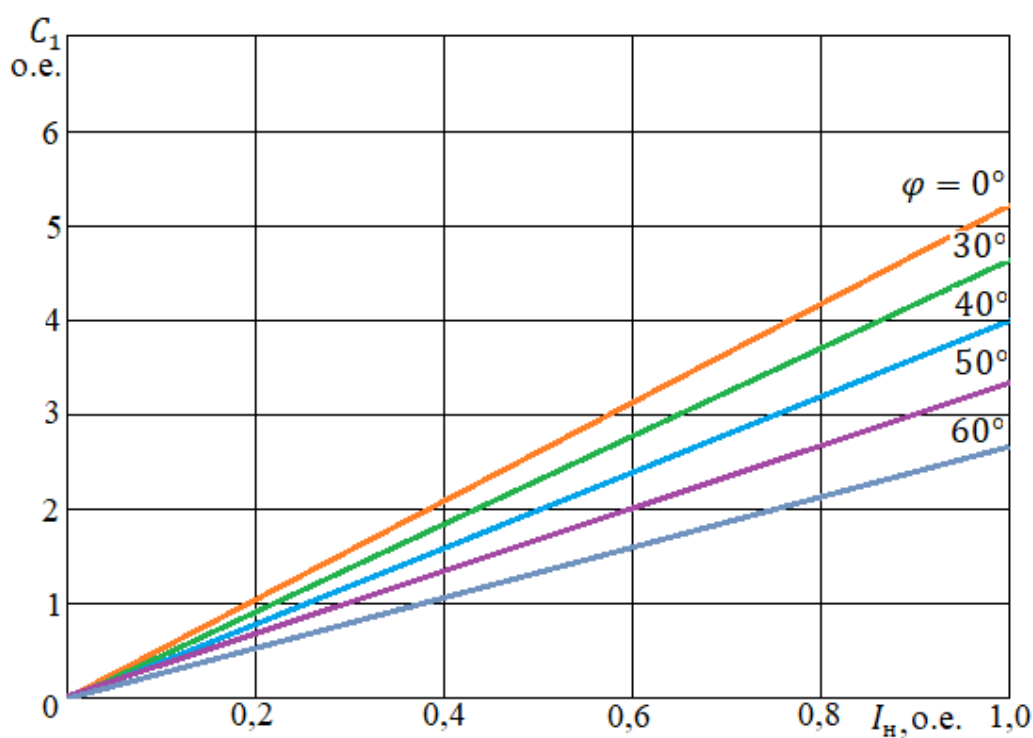


Рисунок 2.3 – Зависимости ёмкости ТПЧФ-1 C_1 от тока линии при $n = 1,0$ [20]

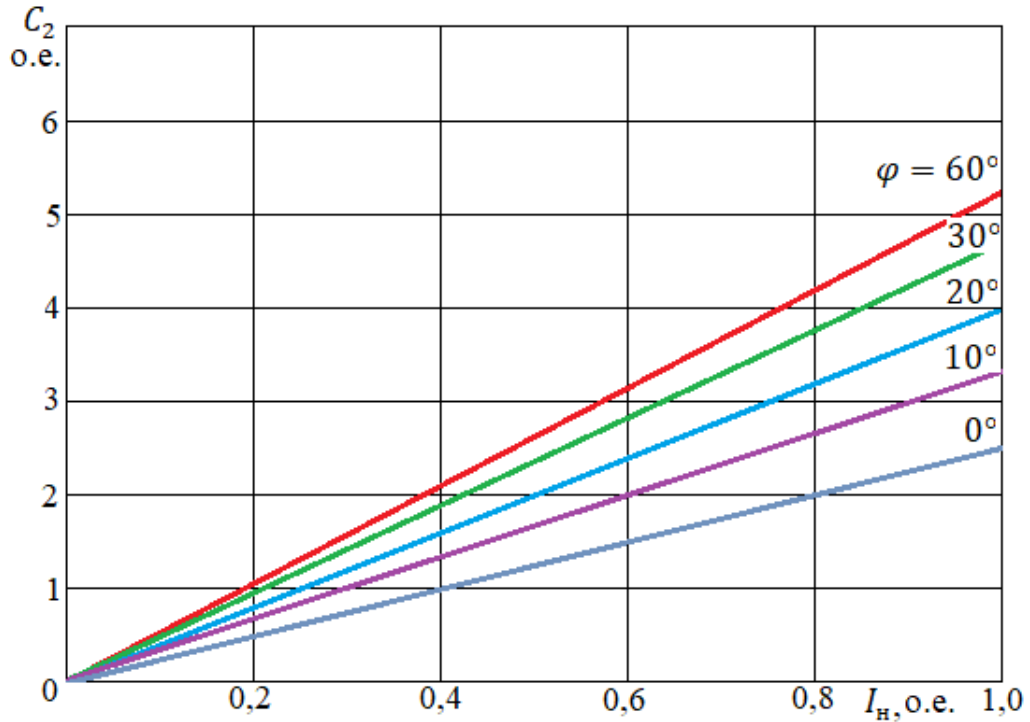


Рисунок 2.4 – Зависимости ёмкости ТПЧФ-1 C_2 от тока линии при $n = 1,0$ [20]

Как видно из графиков (рисунок 2.3 и рисунок 2.4), ёмкости C_1 и C_2 конденсаторных батарей необходимо регулировать при изменении нагрузки в зависимости от тока нагрузки I_H и угла φ нагрузки. Бесконтактное регулирование мощности батарей статических конденсаторов в ТПЧФ-1 может быть достигнуто с помощью тиристорных преобразователей [10].

2.2.6 Определение токов ТПЧФ-1

Определим токи на входе ТПЧФ-1 I'_A, I'_B, I'_C (2.53) в зависимости от сопротивления нагрузки $\underline{Z}_H = R_H + jx_H$ и от сопротивлений симметрирующих элементов $\underline{Z}_1 = -jx_1, \underline{Z}_2 = -jx_2$.

$$\begin{aligned}
 I'_A &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} + \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] = \\
 &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + (1-\underline{a}^2)3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_2 + (1-\underline{a})3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1}{3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1\underline{Z}_2} \right] = \\
 &= -\frac{8U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)(R_H + jx_H)} \left[R_H^2 + 2x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H - jR_H(\sqrt{3}R_H - jx_H) \right] = \\
 &= -\frac{4U_\phi [R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)]}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \tag{2.72}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I'_B &= U_\phi \left[-\frac{8\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} \right] = U_\phi \left[-\frac{8\underline{a}^2\underline{Z}_1 - (1-\underline{a}^2)3n^2\underline{Z}_H}{3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1} \right] = \\
&= \frac{4U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)(R_H + jx_H)} [2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H + jx_H(\sqrt{3}x_H + R_H)] = \\
&= \frac{4U_\phi [2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H]}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \tag{2.73}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I'_C &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] = U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2\underline{Z}_2 - (1-\underline{a})3n^2\underline{Z}_H}{3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_2} \right] = \\
&= -\frac{4U_\phi}{3n^2\underline{Z}_H} [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)] = \\
&= -\frac{4U_\phi [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)]}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)}. \tag{2.74}
\end{aligned}$$

Вывод математических формул для токов I'_A (2.72), I'_B (2.73), I'_C (2.74) произведен в приложении Б, формулы: (Б.1), (Б.4); (Б.2), (Б.5); (Б.3), (Б.6).

Перевод комплексных токов I'_A , I'_B , I'_C (2.72) – (2.74) в геометрическую форму:

$$\left. \begin{aligned}
(R_H^2 + x_H^2) &= Z_H^2 \\
R_H &= Z_H \cos \varphi \\
x_H &= Z_H \sin \varphi
\end{aligned} \right\}; \tag{2.75}$$

$$I'_A = -\frac{4U_\phi [R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)]}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \tag{2.76}$$

$$\begin{aligned}
I'_A &= -\frac{4U_\phi}{3n^2Z_H^2} [Z_H \cos \varphi - j(\sqrt{3}Z_H \cos \varphi + 2Z_H \sin \varphi)] = \\
&= -\frac{4U_\phi Z_H}{3n^2Z_H^2} [\cos \varphi - j(\sqrt{3} \cos \varphi + 2 \sin \varphi)] = \\
&= -\frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} \left[\cos \varphi - j2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right) \right] = \\
&= -\frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} \left\{ \cos \varphi - j2 \left[\cos(30^\circ - \varphi) + \frac{1}{2} \sin \varphi \right] \right\} = \\
&= -\frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} \{ \cos \varphi - j[2 \cos(30^\circ - \varphi) + \sin \varphi] \} = \\
&= \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} \{ -\cos \varphi + j[2 \cos(30^\circ - \varphi) + \sin \varphi] \}; \tag{2.77}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}'_A = \frac{4U_\phi}{3n^2 Z_H} \{-\cos \varphi + j[2 \cos(30^\circ - \varphi) + \sin \varphi]\}; \quad (2.78)$$

В соответствии с выражением (2.129) модуль тока нагрузки (линии) $I_H = \frac{2U_\phi}{nZ_H}$, откуда $Z_H = \frac{2U_\phi}{nI_H}$.

В выражении тока \underline{I}'_A (2.78) заменим Z_H через напряжение U_ϕ и ток I_H , получим:

$$\underline{I}'_A = \frac{2I_H}{3n} \{-\cos \varphi + j[2 \cos(30^\circ - \varphi) + \sin \varphi]\}; \quad (2.79)$$

$$\underline{I}'_B = \frac{4U_\phi}{3n^2 Z_H^2} = [2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H]; \quad (2.80)$$

$$[\dots] = 2Z_H \cos \varphi + \sqrt{3}Z_H \sin \varphi - jZ_H \sin \varphi = Z_H [2 \cos \varphi + \sqrt{3} \sin \varphi - j \sin \varphi];$$

$$\begin{aligned} \underline{I}'_B &= \frac{4U_\phi Z_H}{3n^2 Z_H^2} \left[2 \left(2 \cdot \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) - j \sin \varphi \right] = \\ &= \frac{4U_\phi}{3n^2 Z_H} [2(2 \sin 30^\circ \cos \varphi + \cos 30^\circ \sin \varphi) - j \sin \varphi]; \end{aligned} \quad (2.81)$$

$$\underline{I}'_B = \frac{4U_\phi}{3n^2 Z_H} [2 \cos \varphi + \sqrt{3} \sin \varphi - j \sin \varphi]; \quad (2.82)$$

ИЛИ:

$$\underline{I}'_B = \frac{2I_H}{3n} [2 \cos \varphi + \sqrt{3} \sin \varphi - j \sin \varphi]; \quad (2.83)$$

$$\underline{I}'_C = -\frac{4U_\phi}{3n^2 Z_H^2} [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)]; \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} [\dots] &= (Z_H \cos \varphi + \sqrt{3}Z_H \sin \varphi) + j(Z_H \sin \varphi + \sqrt{3}Z_H \cos \varphi) = \\ &= Z_H [(\cos \varphi + \sqrt{3} \sin \varphi) + j(\sin \varphi + \sqrt{3} \cos \varphi)] = \\ &= Z_H \left[2 \left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) + j 2 \left(\frac{1}{2} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right) \right] = \\ &= 2Z_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ - \varphi)]; \end{aligned} \quad (2.85)$$

$$\underline{I}'_C = -\frac{4U_\phi}{3n^2 Z_H} 2[\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ - \varphi)]; \quad (2.86)$$

ИЛИ:

$$I'_C = -\frac{2I_H}{3n} 2[\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ - \varphi)]. \quad (2.87)$$

Определим токи симметрирующих элементов I_1 и I_2 исходя из выражений (2.28), (2.29) и (2.65), (2.67):

$$I_1 = \frac{U_\phi(1 - \underline{a}^2)}{Z_1} = \frac{U_\phi(1 - \underline{a}^2)}{-jx_1} = \frac{U_\phi(1 - \underline{a}^2)}{-j \left[\frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{8R_H} \right]}; \quad (2.88)$$

$$1 - \underline{a}^2 = \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{1}{2}(3 + j\sqrt{3}) = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3} + j); \quad (2.89)$$

$$1 - \underline{a} = \frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{1}{2}(3 - j\sqrt{3}) = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3} - j); \quad (2.90)$$

$$I_1 = \frac{U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3} + j)8R_H}{-j[3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)]} = \frac{j4U_\phi R_H(\sqrt{3} + j)}{-jj3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \quad (2.91)$$

$$I_1 = \frac{4U_\phi R_H(-1 + j\sqrt{3})}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \quad (2.92)$$

$$I_1 = \frac{4U_\phi Z_H \cos \varphi (-1 + j\sqrt{3})}{3n^2 Z_H^2}; \quad (2.93)$$

$$I_1 = \frac{4U_\phi \cos \varphi 2e^{j120^\circ}}{3n^2 Z_H} = \frac{8U_\phi \cos \varphi e^{j120^\circ}}{3n^2 Z_H} = \frac{4I_H \cos \varphi e^{j120^\circ}}{3n}; \quad (2.94)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{U_\phi(1 - \underline{a})}{Z_2} = \frac{U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3} - j)}{(-jx_2)} = \\ &= \frac{U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{3} - j)}{-j \left[\frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{2(R_H + \sqrt{3}x_H)} \right]} = \frac{jU_\phi^2(\sqrt{3} - j)(R_H + \sqrt{3}x_H)}{-jj[3n^2(R_H^2 + x_H^2)]}; \end{aligned} \quad (2.95)$$

$$I_2 = \frac{2U_\phi(1 + j\sqrt{3})(R_H + \sqrt{3}x_H)}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \quad (2.96)$$

$$I_2 = \frac{2U_\phi(1 + j\sqrt{3})[Z_H \cos \varphi + \sqrt{3}Z_H \sin \varphi]}{3n^2 Z_H^2} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2U_{\phi}(1 + j\sqrt{3}) \left[\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right] \cdot 2}{3n^2 Z_H} = \\
&= \frac{4U_{\phi}(1 + j\sqrt{3}) \sin(30^{\circ} + \varphi)}{3n^2 Z_H}; \tag{2.97}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{I}_2 &= \frac{4U_{\phi} \sin(30^{\circ} + \varphi)}{3n^2 Z_H} 2e^{j60^{\circ}} = \\
&= \frac{8U_{\phi} \sin(30^{\circ} + \varphi)}{3n^2 Z_H} e^{j60^{\circ}} = \frac{4I_H \sin(30^{\circ} + \varphi)}{3n} e^{j60^{\circ}}; \tag{2.98}
\end{aligned}$$

Токи первичных обмоток трансформатора ТПЧФ-1 \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C определяем из уравнений (16):

$$\begin{aligned}
\underline{I}_A &= \underline{I}'_A - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = \\
&= -\frac{4U_{\phi}[R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)]}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} - \frac{4U_{\phi}R_H(-1 + j\sqrt{3})}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} - \frac{2U_{\phi}(1 + j\sqrt{3})(R_H + \sqrt{3}x_H)}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} = \\
&= \frac{2U_{\phi}}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} \left\{ -2[R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)] - \right. \\
&\quad \left. - 2R_H(-1 + j\sqrt{3}) - (1 + j\sqrt{3})(R_H + \sqrt{3}x_H) \right\}; \tag{2.99}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\{ \} &= \{-2R_H + j2(\sqrt{3}R_H + 2x_H) + 2R_H - j2\sqrt{3}R_H - (1 + j\sqrt{3})(R_H + \sqrt{3}x_H)\} = \\
&= j2\sqrt{3}R_H + j4x_H - j2\sqrt{3}R_H - R_H - \sqrt{3}x_H - j\sqrt{3}R_H - j3x_H = \\
&= -R_H - \sqrt{3}x_H + j(x_H - \sqrt{3}R_H); \tag{2.100}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}_A = \frac{2U_{\phi}}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [-(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H)]; \tag{2.101}$$

$$\begin{aligned}
\underline{I}_B = \underline{I}'_B + \underline{I}_1 &= \frac{4U_{\phi}[2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H]}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} + \frac{4U_{\phi}R_H(-1 + j\sqrt{3})}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} = \\
&= \frac{4U_{\phi}}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H + R_H(-1 + j\sqrt{3})]; \tag{2.102}
\end{aligned}$$

$$[] = 2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H - R_H + j\sqrt{3}R_H = R_H + \sqrt{3}x_H + j(\sqrt{3}R_H - x_H); \tag{2.103}$$

$$\underline{I}_B = \frac{4U_{\phi}}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(\sqrt{3}R_H - x_H)]; \tag{2.104}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}'_C + \underline{I}_2 = -\frac{4U_{\phi}}{3n^2 Z_H^2} [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(\sqrt{3}x_H + R_H)] +$$

$$+ \frac{2U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [(1 + j\sqrt{3})(R_H + \sqrt{3}x_H)] = \frac{2U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} \times$$

$$\times \{-2[(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(\sqrt{3}x_H + R_H)] + [(1 + j\sqrt{3})(R_H + \sqrt{3}x_H)]\}; \quad (2.105)$$

$$\{ \} = -2R_H - 2\sqrt{3}x_H - j2\sqrt{3}R_H - j2x_H + R_H + \sqrt{3}x_H + j\sqrt{3}R_H + j3x_H =$$

$$= -R_H - \sqrt{3}x_H - j\sqrt{3}R_H + jx_H = -(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H); \quad (2.106)$$

$$I_C = \frac{2U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [-(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H)]; \quad (2.107)$$

Проверка: $I_A + I_B + I_C = 0$:

$$[-(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H)] + 2[(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(\sqrt{3}R_H - x_H)] +$$

$$+ [-(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H)] = 0; \quad (2.108)$$

В.ч.:

$$-R_H - \sqrt{3}x_H + 2R_H + 2\sqrt{3}x_H - R_H - \sqrt{3}x_H = 0; \quad (2.109)$$

М.ч.:

$$x_H - \sqrt{3}R_H + 2\sqrt{3}R_H - 2x_H + x_H - \sqrt{3}R_H = 0; \quad (2.110)$$

Токи I_A , I_B , I_C в геометрической форме:

$$I_A = \frac{2U_\phi}{3n^2Z_H^2} [-(Z_H \cos \varphi + \sqrt{3}Z_H \sin \varphi) + j(Z_H \sin \varphi - \sqrt{3}Z_H \cos \varphi)] =$$

$$= \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} \left[-\left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) + j \left(\frac{1}{2} \sin \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right) \right]; \quad (2.111)$$

$$I_A = \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} [-\sin(30^\circ + \varphi) - j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.112)$$

$$I_A = -\frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)] =$$

$$= -\frac{2I_H}{3n} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.113)$$

$$I_B = \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H^2} [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(\sqrt{3}R_H - x_H)]; \quad (2.114)$$

$$[] = (Z_H \cos \varphi + \sqrt{3}Z_H \sin \varphi) + j(\sqrt{3}Z_H \cos \varphi - Z_H \sin \varphi) =$$

$$= 2Z_H \left[\left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right) \right] =$$

$$= 2Z_H[(\sin 30^\circ \cos \varphi + \cos 30^\circ \sin \varphi) + j(\cos 30^\circ \cos \varphi - \sin 30^\circ \sin \varphi)]; \quad (2.115)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &= \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} 2[\sin(30^\circ + \varphi) - j\cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= \frac{2I_H}{3n} 2[\sin(30^\circ + \varphi) - j\cos(30^\circ + \varphi)]; \end{aligned} \quad (2.116)$$

$$\underline{I}_C = \frac{2U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [-(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H)]; \quad (2.117)$$

$$\begin{aligned} [] &= 2Z_H[-(Z_H \cos \varphi + \sqrt{3}Z_H \sin \varphi) + j(Z_H \sin \varphi - \sqrt{3}Z_H \cos \varphi)] = \\ &= -2Z_H \left[\left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) + j \left(\frac{1}{2} \sin \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right) \right] = \\ &= 2Z_H[-[(\sin 30^\circ \cos \varphi + \cos 30^\circ \sin \varphi) + j(\cos 30^\circ \sin \varphi - \cos 30^\circ \cos \varphi)]] = \\ &= 2Z_H[-\sin(30^\circ + \varphi) - j\cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= -2Z_H[\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \end{aligned} \quad (2.118)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_C &= -\frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= -\frac{2I_H}{3n} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]. \end{aligned} \quad (2.119)$$

При $\varphi = 0$:

$$\left. \begin{aligned} [] &= \sin 30^\circ + j \cos 30^\circ = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,5^2 + 0,866^2 = 0,25 + 0,75 = 1 \\ &3 + j4 = 5e^{j59,03^\circ} \\ &4 + j3 = 5e^{j40,97^\circ} \\ &\cos \varphi = \frac{4}{5} = 0,8 \\ &\varphi = 40,97^\circ \\ &\sin 30^\circ + j \cos 30^\circ = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = 1e^{j60^\circ} \end{aligned} \right\}; \quad (2.120)$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_C = \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} e^{-j180^\circ} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.121)$$

$$\underline{I}_B = \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} 2[\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.122)$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_A - \underline{I}_C; \quad (2.123)$$

При $\varphi = 0$:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_C = \frac{4U_\phi}{3n^2Z_H} e^{-j120^\circ}. \quad (2.124)$$

Определим токи во вторичных обмотках трансформатора ТПЧФ-1 $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a = \underline{I}_H &= -\frac{2\underline{a}^2 U_\phi}{nZ_H} = -\frac{2\underline{a}^2 U_\phi (R_H - jx_H)}{n(R_H + jx_H)(R_H - jx_H)} = \\ &= -\frac{2U_\phi}{n(R_H^2 + x_H^2)} \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (R_H - jx_H) \right]; \end{aligned} \quad (2.125)$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad (2.126)$$

$$\begin{aligned} [] &= -\frac{1}{2}R_H + j\frac{1}{2}x_H - j\frac{\sqrt{3}}{2}R_H - \frac{\sqrt{3}}{2}x_H = \\ &= \frac{1}{2} [-(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H - \sqrt{3}R_H)]; \end{aligned} \quad (2.127)$$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_H = -\frac{U_\phi}{nZ_H} [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(\sqrt{3}R_H - x_H)]; \quad (2.128)$$

Заменяя в выражении (2.128) $Z_H = \frac{2U_\phi}{nI_H}$, получим:

$$\underline{I}_a = I_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.129)$$

$$\underline{I}_b = -\underline{I}_a = -I_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.130)$$

$$\underline{I}_b = I_H e^{-j180^\circ} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.131)$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_a = I_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \quad (2.132)$$

Перевод комплекса тока из алгебраической формы в показательную, пример:

$$3 + j4 = \sqrt{3^2 + 4^2} e^{j\arctan\frac{3}{4}}; \quad (2.133)$$

$$\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi) = \sqrt{\sin^2 x + \cos^2 x} e^{j\arctan\frac{\cos x}{\sin x}}; \quad (2.134)$$

$$30^\circ + \varphi = x; \quad (2.135)$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_a = \frac{2U_\phi}{nZ_H} 1 e^{j\arctan\frac{\cos(30^\circ + \varphi)}{\sin(30^\circ + \varphi)}}. \quad (2.136)$$

В таблице 2.1 приведены результаты расчёта токов и ёмкостей ТПЧФ-1 в зависимости от угла φ нагрузки.

На рисунке 2.5 построены по данным таблицы 2.1 зависимости токов ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{\text{ном}}$. Из этого графика видно, что токи в первичных обмотках I_A, I_B, I_C и во вторичных обмотках трансформатора I_a, I_b, I_c не зависят от угла φ нагрузки. Токи трёхфазного симметричного источника I'_A, I'_B, I'_C и токи симметрирующих элементов (конденсаторных батарей) I_1 и I_2 зависят от угла φ нагрузки.

Таблица 2.1 – Результаты расчёта токов и ёмкостей ТПЧФ-1 в зависимости от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{\text{ном}}$

Физ. величины	Ед. измер.	Результаты расчёта						
		0	10	20	30	40	50	60
φ	град.	0	10	20	30	40	50	60
I_H	о.е.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$I'_A=I'_B=I'_C$	о.е.	1,33	1,52	1,66	1,81	1,82	1,82	1,76
$I_A = I_C$	о.е.	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
I_B	о.е.	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
$I_a=I_b=I_c$	о.е.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
I_1	о.е.	1,33	1,31	1,25	1,15	1,02	0,85	0,67
I_2	о.е.	0,67	0,86	1,02	1,15	1,25	1,31	1,33
C_1	о.е.	1,54	1,52	1,45	1,33	1,18	0,99	0,77
C_2	о.е.	0,77	0,99	1,18	1,33	1,45	1,52	1,54

От угла φ нагрузки зависят ёмкости конденсаторных батарей C_1 и C_2 (рисунок 2.6). Характер зависимостей C_1 и C_2 от угла φ аналогичен зависимостям токов I_1 и I_2 конденсаторных батарей от угла φ .

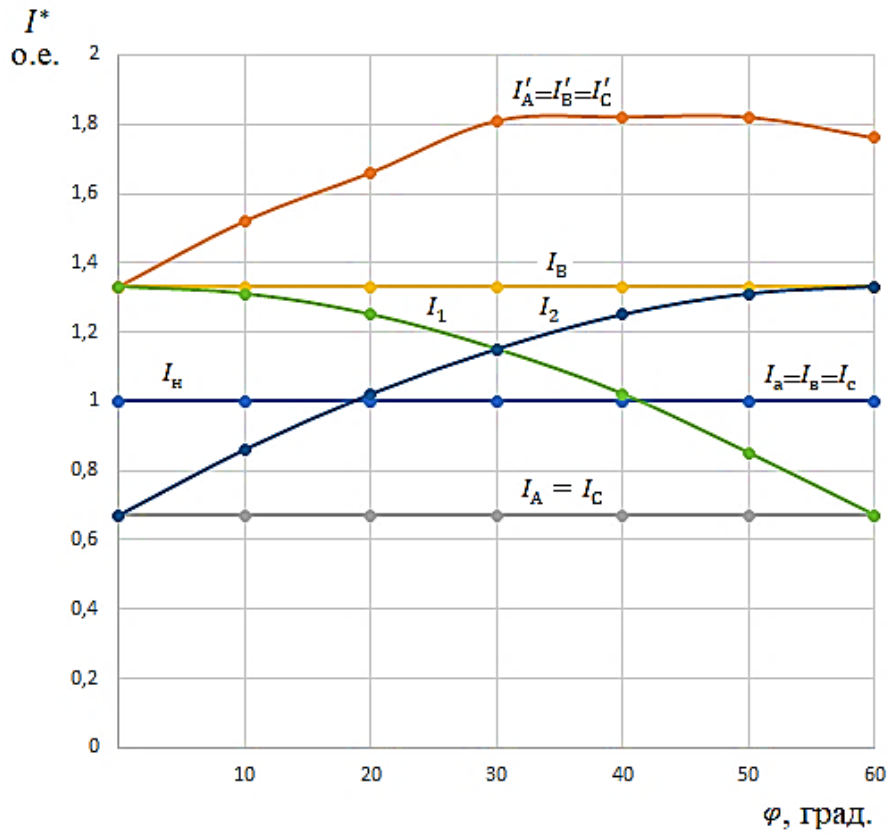


Рисунок 2.5 – Зависимости токов ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{\text{НОМ}}$ [20]

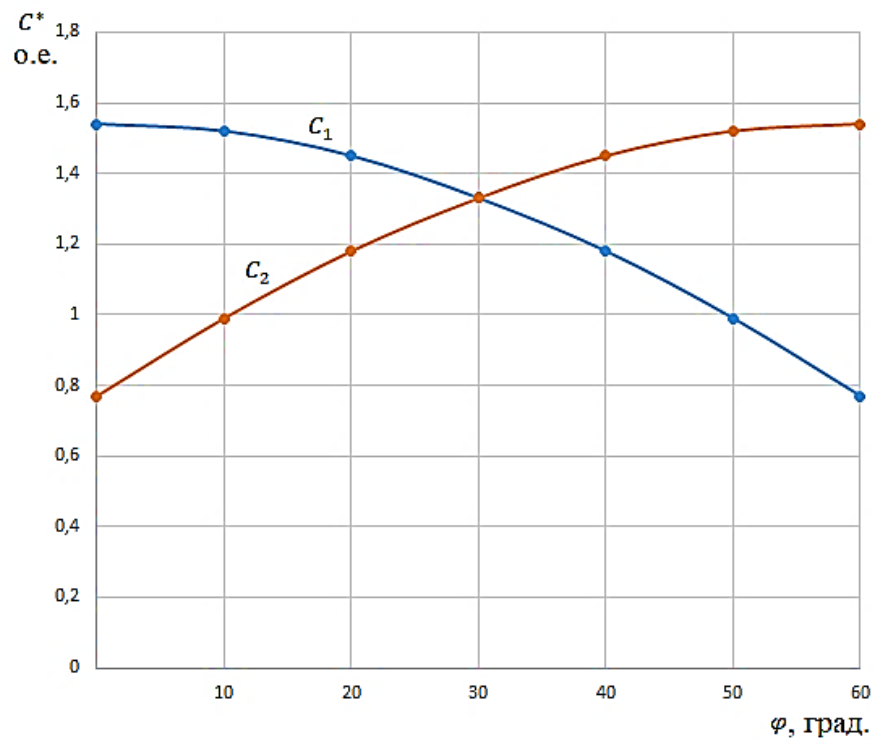


Рисунок 2.6 – Зависимости ёмкостей ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{\text{НОМ}}$

2.2.7 Определение напряжений ТПЧФ-1

Напряжения на первичных обмотках трансформатора ТПЧФ-1 приведены в (2.5).

Напряжения на вторичных обмотках повышающего трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \frac{U_A}{\underline{n}} = \frac{U_A}{-n} = -\frac{U_A}{n} = \frac{U_\Phi}{n} e^{-j180^\circ}; \\ \underline{U}_b &= \frac{U_B}{\underline{n}} = \frac{U_\Phi}{n} e^{j\frac{4\pi}{3}} e^{-j180^\circ} = \frac{U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}; \\ \underline{U}_c &= \frac{U_C}{\underline{n}} = \frac{U_\Phi}{n} e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{-j180^\circ} = \frac{U_\Phi}{n} e^{-j60^\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (2.137)$$

Напряжения на конденсаторных батареях:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_\Phi(1 - \underline{a}^2) = U_\Phi \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{U_\Phi}{2} (3 + j\sqrt{3}) = \\ &= \frac{U_\Phi}{2} 3,464 e^{j30^\circ} = \sqrt{3} U_\Phi e^{j30^\circ}; \end{aligned} \quad (2.138)$$

$$\underline{U}_1 = \sqrt{3} U_\Phi e^{j30^\circ}. \quad (2.139)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= -\underline{U}_{CA} = -(\underline{U}_C - \underline{U}_A) = -(a U_\Phi - U_\Phi) = U_\Phi(1 - a) = U_\Phi \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= \frac{U_\Phi}{2} (3 - j\sqrt{3}) = \frac{U_\Phi}{2} 3,464 e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} U_\Phi e^{-j30^\circ}; \end{aligned} \quad (2.140)$$

$$\underline{U}_2 = \sqrt{3} U_\Phi e^{-j30^\circ}; \quad (2.141)$$

Напряжение однофазной нагрузки определяем по формуле (2.12):

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_b - \underline{U}_a - \underline{U}_c = \frac{U_\Phi}{n} [e^{j60^\circ} - e^{-j180^\circ} - e^{-j60^\circ}] = \\ &= \frac{U_\Phi}{n} [\cos 60^\circ + j \sin 60^\circ + 1 - \cos 60^\circ + j \sin 60^\circ] = \frac{U_\Phi}{n} [j2 \sin 60^\circ + 1] = \\ &= \frac{U_\Phi}{n} \left[j2 \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right] = \frac{U_\Phi}{n} (j\sqrt{3} + 1); \end{aligned} \quad (2.142)$$

$$\underline{U} = \frac{2U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}. \quad (2.143)$$

2.2.8 Построение векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-1 при

$$\varphi = 0, n = 1, 0, I_H = I_{H(\text{ном})}$$

При построении векторной диаграммы для ТПЧФ-1 напряжения и токи выражаем в относительных единицах. С этой целью задаёмся базисными значениями напряжений $U_6 = U_\Phi = 220 \text{ В}$, и токов $I_6 = I_{H(\text{ном})}$. Для перевода напряжений и токов в относительные единицы делим все напряжения и токи на базисные величины U_6, I_6 . Векторную диаграмму для напряжений и токов ТПЧФ-1 (рисунок 2.7) строим в масштабе для относительных напряжений и токов U^*, I^* , в 1 см 0,2 о.е. напряжения и тока. Для определения длины вектора напряжения или тока в сантиметрах делим величину напряжения (тока) в о.е. на масштаб $m_U (m_I) = 0,2$.

Построение векторной диаграммы напряжений ТПЧФ-1 (рисунок 2.7)

На векторной диаграмме в обозначении относительных величин знак (*) для упрощения диаграммы опущен.

Комплексы фазных напряжений в о.е. первичной обмотки трансформатора (2.5):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A^* &= \frac{U_A}{U_6} = 1,0 \\ \underline{U}_B^* &= \frac{U_B}{U_6} = 1 \cdot \underline{a}^2 \\ \underline{U}_C^* &= \frac{U_C}{U_6} = 1 \cdot \underline{a} \end{aligned} \right\}; \quad (2.144)$$

Длина векторов $\underline{U}_A^*, \underline{U}_B^*, \underline{U}_C^* = \frac{1 \cdot \underline{a}}{m_U} = \frac{1 \cdot \underline{a}}{0,2} = 5 \cdot \underline{a}$ см.

Строим симметричную звезду фазных напряжений: $\underline{U}_A^*, \underline{U}_B^*, \underline{U}_C^*$.

Междуфазные напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше фазных и опережают их на 30° :

$$\underline{U}_{AB}^* = \frac{\sqrt{3} \underline{U}_L^* e^{j30^\circ}}{U_6} = 1,73 e^{j30^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow \frac{1,73}{0,2} e^{j30^\circ} = 8,65 e^{j30^\circ} \text{ см.} \quad (2.145)$$

Аналогично получаем:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{BC}^* &= 8,65 e^{-j90^\circ} \text{ см} \\ \underline{U}_{CA}^* &= 8,65 e^{j150^\circ} \text{ см} \end{aligned} \right\}; \quad (2.146)$$

Соединяя концы векторов фазных напряжений $\underline{U}_A^*, \underline{U}_B^*, \underline{U}_C^*$, получаем равно-сторонний треугольник междуфазных напряжений $\underline{U}_{AB}^*, \underline{U}_{BC}^*, \underline{U}_{CA}^*$.

Напряжения на вторичных обмотках повышающего трансформатора ТПЧФ-1, как видно из формул (2.132) при $n = 1,0$ по величине равны U_Φ и находятся в противофазе к фазным напряжениям первичной обмотки, т.е.:

$\underline{U}_a^* = 1 \cdot e^{-j180^\circ}$, $\underline{U}_b^* = 1 \cdot e^{j60^\circ}$, $\underline{U}_c^* = 1 \cdot e^{-j60^\circ}$, по длине векторы \underline{U}_a^* , \underline{U}_b^* , \underline{U}_c^* составляют $\frac{1}{0,2} = 5$ см.

Строим в противофазе к векторам \underline{U}_A^* , \underline{U}_B^* , \underline{U}_C^* векторы \underline{U}_a^* , \underline{U}_b^* , \underline{U}_c^* .

Напряжения на конденсаторных батареях определяются формулами (2.135) и (2.137):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1^* &= \sqrt{3}e^{j30^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 8,65e^{j30^\circ} \text{ см} \\ \underline{U}_2^* &= \sqrt{3}e^{-j30^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 8,65e^{-j30^\circ} \text{ см} \end{aligned} \right\} \quad (2.147)$$

Напряжение на диаграмме $\underline{U}_1^* = \underline{U}_{AB}^*$, а напряжение $\underline{U}_2^* = -\underline{U}_{CA}^*$.

Напряжение на двухпроводной линии определяется формулой (2.76); в относительных единицах: $U^* = 2e^{j60^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 10e^{j60^\circ} \text{ см}$, или по уравнению (2.9) $U^* = \underline{U}_b^* - \underline{U}_a^* - \underline{U}_c^*$; на векторной диаграмме это уравнение выполняется.

Построение векторной диаграммы токов ТПЧФ-1 (рисунок 2.7)

Комплексные токи на входе ТПЧФ-1 I'_A , I'_B , I'_C представлены математическими выражениями (2.78), (2.79) и (2.80). Выражения этих токов в относительных единицах имеют вид: $I'_A = \frac{2}{3} \left[-1 + j \frac{2\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{2}{3} (-1 + j\sqrt{3}) = \frac{2}{3} \times 2e^{j120^\circ} = \frac{4}{3} e^{j120^\circ} = 1,33e^{j120^\circ} \text{ о. е.}$ Разделив это выражение на масштаб тока $m_I = 0,2$, получим длину вектора: $I'_A = 6,67e^{j120^\circ} \text{ см.}$, $I'_B = \frac{4}{3} = 1,33 \text{ о. е.}$ или $6,67 \text{ см.}$, $I'_C = -\frac{2}{3} \left[2 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{4}{3} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{4}{3} e^{-j120^\circ} = 1,33e^{-j120^\circ} \text{ о. е.}$ или $6,67e^{-j120^\circ} \text{ см.}$

На векторной диаграмме вектор I'_A совпадает по направлению с вектором \underline{U}_C , вектор I'_B совпадает с \underline{U}_A , и вектор I'_C совпадает \underline{U}_B .

Токи первичных обмоток трансформатора ТПЧФ-1 I_A , I_B , I_C представлены выражениями (2.63), (2.64) и (2.65).

В относительных единицах эти токи имеют вид:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A^* = \underline{I}_C^* &= -\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{2}{3} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= \frac{2}{3} e^{-j120^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 3,33 e^{-j120^\circ} \text{ см,} \end{aligned} \quad (2.148)$$

$$\underline{I}_B^* = \frac{2}{3} \cdot 2 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{4}{3} e^{j60^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 6,67 e^{j60^\circ} \text{ см.} \quad (2.149)$$

Векторы токов $\underline{I}_A^* = \underline{I}_C^*$ совпадают на векторной диаграмме с вектором напряжения \underline{U}_B^* , а вектор \underline{I}_B^* по длине в два раза больше вектора \underline{I}_A^* и находится с ним в противофазе.

Токи вторичных обмоток трансформатора $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$, соединенных последовательно и ток нагрузки \underline{I}_H представлены выражениями (2.129), (2.130) и (2.129). В относительных единицах эти токи имеют вид:

$$\underline{I}_a^* = \underline{I}_H^* = 1 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 1 e^{j60^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 5 e^{j60^\circ} \text{ см,} \quad (2.150)$$

$$\underline{I}_b^* = -\underline{I}_a^* = -1 \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 1 \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 1 e^{-j120^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 5 e^{-j120^\circ}, \quad (2.151)$$

$$\underline{I}_c^* = \underline{I}_a^* = 1 e^{j60^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 5 e^{j60^\circ}. \quad (2.152)$$

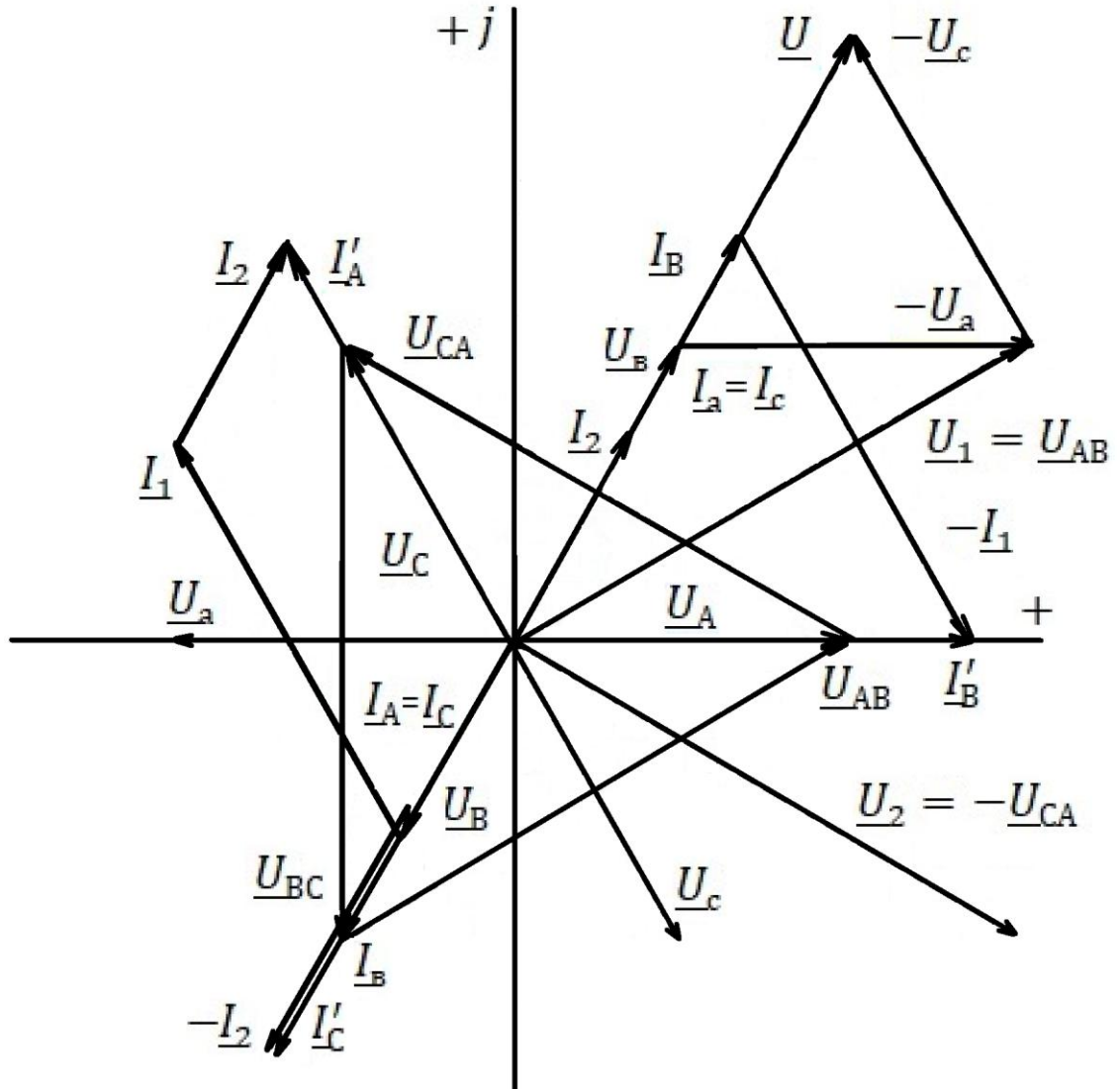


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма напряжений и токов для ТПЧФ-1 при $\varphi = 0$,
 $n = 1,0, I_H = I_{H(\text{ном})}$ [20]

На векторной диаграмме вектор $I_a^* = I_c^*$ совпадает по фазе с вектором напряжения \underline{U}_B^* , а вектор тока I_B^* находится в противофазе к вектору I_a^* .

Комплексы токов конденсаторных батарей I_1 и I_2 представлены формулами (2.94), (2.98). В относительных единицах эти токи имеют вид:

$$\underline{I}_1^* = \frac{4}{3} e^{j120^\circ} = 1,33 e^{j120^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 6,65 e^{j120^\circ} \text{ см,} \quad (2.153)$$

$$\underline{I}_2^* = \frac{2}{3} e^{j60^\circ} = 0,67 e^{j60^\circ} \text{ о. е.} \rightarrow 3,33 e^{j60^\circ} \text{ см.} \quad (2.154)$$

На векторной диаграмме вектор тока \underline{I}_1^* опережает напряжение конденсаторной батареи \underline{U}_1^* на 90° , а вектор тока \underline{I}_2^* опережает напряжение \underline{U}_2^* тоже на 90° , что соответствует физическим процессам в конденсаторах.

2.2.9 Выводы из векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-1

Трёхфазная система токов $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$ при симметричной системе напряжений симметрична, т.е. ТПЧФ-1 осуществляет фазопреобразование трёхфазного тока в однофазный за счёт специальной схемы соединения обмоток и симметрирующих конденсаторных батарей (рисунок 2.2).

1. Трёхфазная система токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ первичных обмоток трансформатора несимметрична: токи $\underline{I}_A = \underline{I}_C$ в два раза меньше тока \underline{I}_B и находятся к нему в противофазе.
1. За счёт токов конденсаторных батарей \underline{I}_1 и \underline{I}_2 несимметричная система токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ преобразуется в симметричную (по уравнениям (2.6), (2.7), (2.8)): $\underline{I}'_A = \underline{I}_A + \underline{I}_1 + \underline{I}_2, \underline{I}'_B = \underline{I}_B + \underline{I}_1, \underline{I}'_C = \underline{I}_C + \underline{I}_2$ (рисунок 2.7).
2. Токи вторичных обмоток трансформатора, соединённых последовательно, равны по величине, но имеют разные направления: $\underline{I}_a = \underline{I}_c$, а \underline{I}_b находится в противофазе к ним (рисунок 2.7). Эти токи создают на выходе ТПЧФ-1 однофазное напряжение U , которое при $n = 1,0$ в два раза больше напряжения U_Φ (уравнение (2.9)): $\underline{U} = \underline{U}_b - \underline{U}_a - \underline{U}_c = \frac{2U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}$.
3. Токи конденсаторных батарей \underline{I}_1 и \underline{I}_2 опережают напряжения $\underline{U}_1 = \underline{U}_{AB}$ и $\underline{U}_2 = -\underline{U}_{CA}$ на угол $\pi/2$ (рисунок 2.7).
4. Таким образом, с помощью векторной диаграммы для ТПЧФ-1 с симметрирующими устройствами на низкой стороне трансформатора при $\varphi = 0, n = 1,0, I_H = I_{H(\text{ном})}$ (рисунок 2.7) раскрыто фазопреобразование трёхфазного симметричного тока в однофазный для двухпроводной системы электропередачи.

2.2.10 Векторная диаграмма напряжений и токов ТПЧФ-1 при $\varphi = 60^\circ$, $n = 1, 0, I_H = I_{\text{НОМ}}$

Векторная диаграмма ТПЧФ-1 при $\varphi = 60^\circ$ изображена на рисунке 2.8. Она построена аналогично векторной диаграмме ТПЧФ-1 при угле $\varphi = 0$ (рисунок 2.7). Как видно из диаграммы и графиков рисунок 2.5 и 2.6, с изменением угла φ нагрузки изменяются ёмкости конденсаторных батарей C_1 и C_2 и входные токи ТПЧФ-1 $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$. При этом токи в первичных и вторичных обмотках трансформатора остаются неизменными при постоянной нагрузке. Ток нагрузки I_H отстает по фазе от напряжения на выходе трансформатора U на угол $\varphi = 60^\circ$, Токи конденсаторных батарей \underline{I}_1 и \underline{I}_2 опережают свои напряжения на угол $\pi/2$.

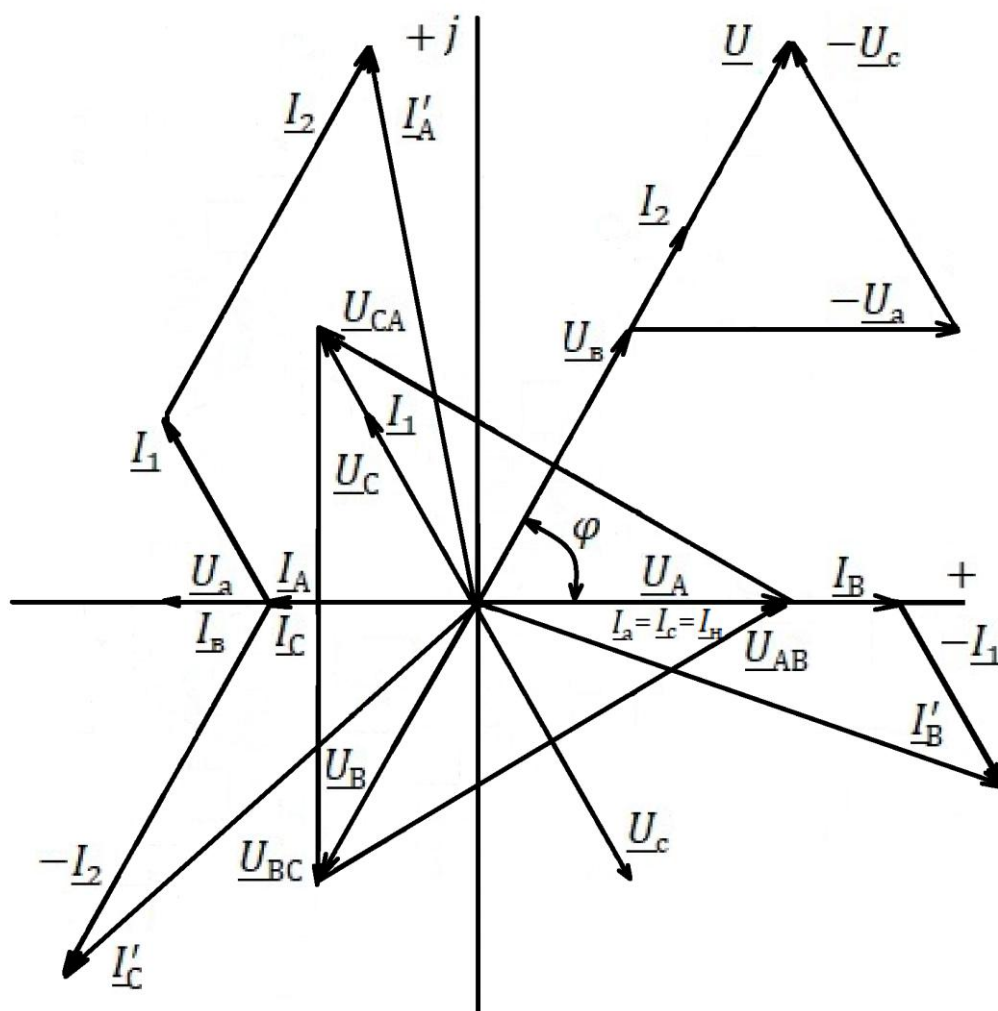


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма напряжений и токов для ТПЧФ-1 при $\varphi = 60^\circ$, $n = 1, 0, I_H = I_{\text{НОМ}}$

2.2.11 Определение мощности ТПЧФ-1

Комплексная мощность однофазной нагрузки \underline{S}_H :

$$\begin{aligned}\underline{S}_H &= \underline{U} \cdot \underline{i}_H = \frac{\sqrt{3}U_\Phi}{n} e^{-j90^\circ} \cdot \frac{2U_\Phi}{Z_H n} [\sin(30^\circ + \varphi) - j \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= \frac{2\sqrt{3}U_\Phi^2}{n^2 Z_H} (-j) [\sin(30^\circ + \varphi) - j \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= \frac{2\sqrt{3}U_\Phi^2}{n^2 Z_H} [-\cos(30^\circ + \varphi) - j \sin(30^\circ + \varphi)];\end{aligned}\quad (2.155)$$

где \underline{i}_H – сопряжённый комплекс тока нагрузки.

$$Z_H = \frac{2U_\Phi}{nI_H}; \quad (2.156)$$

$$\underline{S}_H = \frac{\sqrt{3}U_\Phi I_H}{n} [\cos(30^\circ + \varphi) + j \sin(30^\circ + \varphi)]. \quad (2.157)$$

Комплексная мощность первого симметрирующего элемента \underline{S}_1 :

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= \underline{U}_1 \cdot \underline{i}_1 = \sqrt{3}U_\Phi e^{j30^\circ} \cdot \frac{8U_\Phi \cos \varphi e^{-j120^\circ}}{3n^2 Z_H} = \\ &= \frac{8U_\Phi^2 \cos \varphi}{\sqrt{3}n^2 Z_H} e^{-j90^\circ} = -j \frac{8U_\Phi^2 \cos \varphi}{\sqrt{3}n^2 Z_H};\end{aligned}\quad (2.158)$$

где \underline{i}_1 – сопряжённый комплекс тока первого симметрирующего элемента.

$$\underline{S}_1 = -j \frac{4U_\Phi I_H \cos \varphi}{\sqrt{3}n}; \quad (2.159)$$

Комплексная мощность второго симметрирующего элемента \underline{S}_2 :

$$\begin{aligned}\underline{S}_2 &= \underline{U}_2 \cdot \underline{i}_2 = \sqrt{3}U_\Phi e^{-j30^\circ} \cdot \frac{8U_\Phi \sin(30^\circ + \varphi)}{3n^2 Z_H} e^{-j60^\circ} = \\ &= \frac{8U_\Phi^2 \sin(30^\circ + \varphi)}{\sqrt{3}n^2 Z_H} e^{-j90^\circ} = -j \frac{8U_\Phi^2 \sin(30^\circ + \varphi)}{\sqrt{3}n^2 Z_H};\end{aligned}\quad (2.160)$$

где \underline{i}_2 – сопряжённый комплекс тока второго симметрирующего элемента.

$$\underline{S}_2 = -j \frac{4U_\Phi I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{\sqrt{3}n}. \quad (2.161)$$

Комплексная мощность трансформатора \underline{S}_T :

$$\underline{S}_T = \underline{U}_A \cdot \underline{i}_A + \underline{U}_B \cdot \underline{i}_B + \underline{U}_C \cdot \underline{i}_C =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{4U_{\Phi}}{3n^2Z_H} [U_{\Phi}e^{j120^\circ} + U_{\Phi}e^{-j120^\circ}2e^{-j60^\circ} + U_{\Phi}e^{j120^\circ}e^{j120^\circ}] = \\
&= \frac{4U_{\Phi}^2}{3n^2Z_H} [e^{j120^\circ} + e^{-j180^\circ} + e^{j240^\circ}] = -\frac{2 \cdot 4U_{\Phi}^2}{3n^2Z_H} = -\frac{4U_{\Phi}I_H}{3n}; \quad (2.162)
\end{aligned}$$

где $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ – сопряжённые комплексы токов фаз А, В и С соответственно.

$$[-0,5 + j0,866 - 1 - 0,5 - j0,866] = -2; \quad (2.163)$$

При $\varphi = 0$:

$$\underline{S}_H = -\frac{2\sqrt{3}U_{\Phi}^2}{n^2Z_H} (\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) = -\frac{2\sqrt{3}U_{\Phi}^2}{n^2Z_H} e^{j30^\circ}. \quad (2.164)$$

При $\varphi = 30^\circ$:

$$\frac{S_{BX}}{S_H} = \frac{2 \cdot 4U_{\Phi}^2}{3n^2Z_H} \frac{n^2Z_H}{2 \cdot \sqrt{3}U_{\Phi}^2} = \frac{8}{6\sqrt{3}} = \frac{8}{10,4} = 0,77. \quad (2.165)$$

Результаты вычислений приведённых в главе 2 сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Математические выражения для расчёта трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1 с конденсаторными батареями на низкой стороне трансформатора

Название физической величины	№ п/п	Формула	Номер формулы в тексте
1	2	3	4
Напряжение на первичных обмотках трансформатора	1	По оси вещественных направлен вектор $\underline{U}_A = U_{\Phi}$ $\underline{U}_A = U_{\Phi}; \underline{U}_B = U_{\Phi}e^{j\frac{4\pi}{3}}; \underline{U}_C = U_{\Phi}e^{j\frac{2\pi}{3}}$	(2.5)
Напряжение на вторичных обмотках повышающего трансформатора	2	$\underline{U}_a = \frac{U_{\Phi}}{n} e^{-j180^\circ}; \underline{U}_b = \frac{U_{\Phi}}{n} e^{j60^\circ};$ $\underline{U}_c = \frac{U_{\Phi}}{n} e^{-j60^\circ}$	(2.137)
Однофазное напряжение на выходе трансформатора	3	$\underline{U} = \frac{2U_{\Phi}}{n} e^{j60^\circ}$	(2.143)
Напряжения симметрирующих элементов	4	$\underline{U}_1 = \sqrt{3}U_{\Phi}e^{j30^\circ};$	(2.133)
		$\underline{U}_2 = \sqrt{3}U_{\Phi}e^{-j30^\circ}$	(2.135)

Продолжение таблицы 2.2

Название физической величины	№ п/п	Формула	Номер формулы в тексте
1	2	3	4
Сопротивления симметрирующих элементов	5	$x_1 = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{8 \cos \varphi}$	(2.65)
	6	$x_2 = \frac{3\sqrt{3}n^2 Z_H}{8 \sin(30^\circ + \varphi)}$	(2.67)
Система токов трёхфазного источника	7	$\underline{I}'_A = \frac{2I_H}{3n} \times$ $\times \{-\cos \varphi + j[2 \cos(30^\circ - \varphi) + \sin \varphi]\}$	(2.79)
	8	$\underline{I}'_B = \frac{2I_H}{3n} [2 \cos \varphi + \sqrt{3} \sin \varphi - j \sin \varphi]$	(2.83)
	9	$\underline{I}'_C = -\frac{2I_H}{3n} 2[\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ - \varphi)]$	(2.87)
Токи симметрирующих элементов	10	$\underline{I}_1 = \frac{4I_H \cos \varphi e^{j120^\circ}}{3n}$	(2.94)
	11	$\underline{I}_2 = \frac{4I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3n} e^{j60^\circ}$	(2.98)
Токи первичных обмоток трансформатора	12	$\underline{I}_A = -\frac{2I_H}{3n} [\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ + \varphi)]$	(2.113)
	13	$\underline{I}_B = \frac{2I_H}{3n} 2[\sin(30^\circ + \varphi) - j \cos(30^\circ + \varphi)]$	(2.116)
	14	$\underline{I}_C = -\frac{2I_H}{3n} [\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ + \varphi)]$	(2.119)
Токи вторичных обмоток трансформатора	15	$\underline{I}_a = \underline{I}_c = \underline{I}_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ + \varphi)]$	(2.129)
	16	$\underline{I}_b = -\underline{I}_a = -\underline{I}_H [\sin + j \cos(30^\circ + \varphi)]$	(2.130)
Ток однофазной нагрузки	17	$I_H = \frac{2U_\Phi}{nZ_H} [\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ + \varphi)]$	
Комплексная мощность однофазной нагрузки	18	$\underline{S}_H = \frac{\sqrt{3}U_\Phi I_H}{n} [\cos(30^\circ + \varphi) + j \sin(30^\circ + \varphi)]$	(2.157)

Продолжение таблицы 2.2

Название физической величины 1	№ п/п 2	Формула 3	Номер формулы в тексте 4
Комплексная мощность трансформатора	21	$\underline{S}_T = \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = -\frac{4U_\Phi I_H}{3n}$	(2.162)
Ёмкости симметрирующих элементов	22	$C_1 = \frac{8 I_H \cos \varphi}{3\sqrt{3}n^2 \omega U}$	(2.68)
	23	$C_2 = \frac{8 I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3\sqrt{3}n^2 \omega U}$	(2.69)

2.3 Выводы по второй главе

1. Для изготовления трансформаторного преобразователя числа фаз, преобразующего трёхфазный ток в однофазный (ТПЧФ-1), рекомендуется использовать типовой повышающий трёхфазный трансформатор со схемой соединения Y/Y_H в режиме трехфазно-однофазного трансформатора с двумя конденсаторными батареями на его низкой стороне.
2. В результате анализа трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1 решена система уравнений для схемы трёхфазно-однофазного трансформатора с двумя конденсаторными батареями. При этом применены метод симметричных составляющих, комплексный метод и матричный метод.
3. Определены параметры симметрирующих элементов, зависимости ёмкостей конденсаторных батарей от величины однофазной нагрузки и её коэффициента мощности ($\cos \varphi$).
4. Определены напряжения, токи и мощности трёхфазного источника питания, первичных и вторичных обмоток трансформатора, однофазной нагрузки и симметрирующих элементов.
5. Построены векторные диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-1, с помощью которых установлен принцип работы преобразователя трёхфазного тока в однофазный.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ТПЧФ-2 С ФАЗОПРЕОБРАЗУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА НИЗКОЙ СТОРОНЕ ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Цель и задачи анализа ТПЧФ-2

Целью анализа ТПЧФ-2 является установление возможности преобразования однофазного тока в трёхфазный с помощью понижающего трёхфазного трансформатора и двух конденсаторных батарей на низкой стороне трансформатора.

К задачам анализа ТПЧФ-2 относятся:

1. Определение зависимостей изменения ёмкостей конденсаторных батарей ТПЧФ-2 от величины тока и коэффициента мощности трёхфазной нагрузки.
2. Определение зависимости токов и напряжений первичных и вторичных обмоток трансформатора и конденсаторных батарей от тока нагрузки.
3. Определение зависимости мощностей трансформатора и конденсаторных батарей от мощности трёхфазной нагрузки.
4. Составление баланса мощностей.

3.2 Уравнения для ТПЧФ-2

Допущения, принятые при анализе ТПЧФ-2 такие же, как и для ТПЧФ-1.

Схема ТПЧФ-2 представлена на рисунке 3.1.

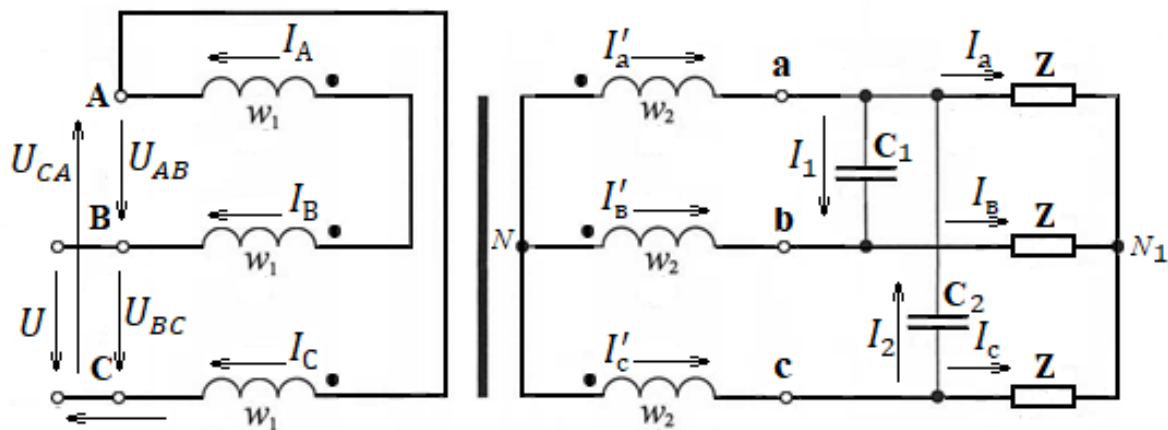


Рисунок 3.1 – Схема ТПЧФ-2

Комплексный коэффициент трансформации по напряжению для идеального трансформатора не зависит от нагрузки:

$$\underline{n} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_a} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{U}_b} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{U}_c} = ne^{j180^\circ} = -n, \quad (3.1)$$

где $n = \frac{w_1}{w_2}$;

$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – комплексы фазных напряжений первичной обмотки трансформатора;

$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – комплексы фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора.

Комплексные сопротивления конденсаторных батарей:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= -jx_1 = x_1 e^{-j90^\circ}; \\ \underline{Z}_2 &= -jx_2 = x_2 e^{-j90^\circ}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Трёхфазная нагрузка симметрична, имеет индуктивный характер.

Комплексное сопротивление одной фазы:

$$\underline{Z} = R + jx = Ze^{j\varphi}. \quad (3.3)$$

При симметричной трёхфазной нагрузке узловое напряжение $U_{NN_1} = 0$, тогда напряжение на вторичных обмотках трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}'_a &= \underline{U}_a; \\ \underline{U}'_b &= \underline{U}_b; \\ \underline{U}'_c &= \underline{U}_c; \\ \underline{U}'_a &= \underline{U}_\phi; \\ \underline{U}'_b &= \underline{U}_\phi e^{-j\frac{4\pi}{3}}; \\ \underline{U}'_c &= \underline{U}_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

С учётом равенств (3.4) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{n} \underline{U}_a = \underline{n} \underline{I}_a \underline{Z}; \\ \underline{U}_B &= \underline{n} \underline{U}_b = \underline{n} \underline{I}_b \underline{Z}; \\ \underline{U}_C &= \underline{n} \underline{U}_c = \underline{n} \underline{I}_c \underline{Z}. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

При анализе ТПЧФ-2 направляем по оси вещественных вектор однофазного напряжения $\underline{U} = U$.

Составим следующие уравнения для схемы, изображённой на рисунке 3.1:

$$\underline{U}_C - \underline{U} - \underline{U}_B + \underline{U}_A = 0, \text{ откуда } \underline{U} = \underline{U}_A - \underline{U}_B + \underline{U}_C; \quad (3.6)$$

$$\underline{U}_a - \underline{U}_B - \underline{U}_1 = 0, \text{ или } \underline{U}_1 = \underline{U}_a - \underline{U}_B = \underline{U}_{aB}; \quad (3.7)$$

$$\underline{U}_a - \underline{U}_C + \underline{U}_2 = 0, \text{ или } \underline{U}_2 = \underline{U}_C - \underline{U}_a = \underline{U}_{Ca}. \quad (3.8)$$

На основании закона равновесия МДС вдоль замкнутого контура трансформатора составляем два уравнения [27]:

$$-\underline{I}_A w_1 + \underline{I}'_a w_2 - \underline{I}'_B w_2 + \underline{I}_B w_1 = 0; \quad (3.9)$$

$$-\underline{I}_B w_1 + \underline{I}'_B w_2 - \underline{I}'_C w_2 + \underline{I}_C w_1 = 0. \quad (3.10)$$

Остальные уравнения составляем по законам Кирхгофа:

Узел №1:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0; \quad (3.11)$$

Узел а:

$$-\underline{I}_1 - \underline{I}_a + \underline{I}_2 + \underline{I}'_a = 0; \quad (3.12)$$

Узел в:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_B - \underline{I}_B = 0; \quad (3.13)$$

Узел с:

$$\underline{I}'_C - \underline{I}_2 - \underline{I}_C = 0; \quad (3.14)$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_C = -\underline{I}_B = \underline{I}. \quad (3.15)$$

3.3 Решение уравнений для ТПЧФ-2

Разделим (3.9), (3.10) на w_2 :

$$-\underline{I}_A n + \underline{I}'_a - \underline{I}'_B + \underline{I}_B n = 0; \quad (3.16)$$

$$-\underline{I}_B n + \underline{I}'_B - \underline{I}'_C + \underline{I}_C n = 0. \quad (3.17)$$

Из уравнений (3.12) – (3.14):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}'_a &= \underline{I}_a + \underline{I}_1 - \underline{I}_2; \\ \underline{I}'_B &= \underline{I}_B - \underline{I}_1; \\ \underline{I}'_C &= \underline{I}_C + \underline{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Подставляем (3.18) в (3.16):

$$-\underline{I}_A n + \underline{I}_a + \underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_B + \underline{I}_1 + \underline{I}_B n = 0; \quad (3.19)$$

$$-\underline{I}_A n + \underline{I}_B n + \underline{I}_a - \underline{I}_B + 2\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0. \quad (3.20)$$

Учитывая (3.15), получим:

$$-\underline{I}n - \underline{I}n + \underline{I}_a - \underline{I}_B + 2\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0; \quad (3.21)$$

$$-2\underline{I}n + \underline{I}_a - \underline{I}_B + 2\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0. \quad (3.22)$$

Подставим (3.18) в (3.17):

$$-\underline{I}_B n + \underline{I}_B - \underline{I}_1 - \underline{I}_c - \underline{I}_2 + \underline{I}_c n = 0; \quad (3.23)$$

Учитывая (3.15), получим:

$$\underline{I}n + \underline{I}n + \underline{I}_B - \underline{I}_c - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0; \quad (3.24)$$

$$2\underline{I}n + \underline{I}_B - \underline{I}_c - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0. \quad (3.25)$$

Просуммируем уравнения (3.22) и (3.25), исключая \underline{I} :

$$\underline{I}_a - \underline{I}_c + \underline{I}_1 - 2\underline{I}_2 = 0. \quad (3.26)$$

Определим токи конденсаторных батарей \underline{I}_1 и \underline{I}_2 :

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{aB}}{\underline{Z}_1} = \frac{\underline{U}_a - \underline{U}_B}{\underline{Z}_1} = \frac{\underline{I}_a \underline{Z} - \underline{I}_B \underline{Z}}{\underline{Z}_1} = \frac{(\underline{I}_a - \underline{I}_B) \underline{Z}}{\underline{Z}_1}; \quad (3.27)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{U}_c - \underline{U}_a}{\underline{Z}_2} = \frac{(\underline{I}_c - \underline{I}_a) \underline{Z}}{\underline{Z}_2}. \quad (3.28)$$

Подставляем в (3.26) \underline{I}_1 и \underline{I}_2 из (3.27) и (3.28):

$$\underline{I}_a - \underline{I}_c + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} (\underline{I}_a - \underline{I}_B) - \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} (\underline{I}_c - \underline{I}_a) = 0; \quad (3.29)$$

$$\underline{I}_a - \underline{I}_c + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} \underline{I}_a - \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} \underline{I}_B - \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} \underline{I}_c + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} \underline{I}_a = 0; \quad (3.30)$$

$$\underline{I}_a \left(1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} \right) - \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} \underline{I}_B - \underline{I}_c \left(1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} \right) = 0. \quad (3.31)$$

Подставляем (3.5) в уравнение (3.6), получим:

$$\underline{U} = \underline{n} \underline{I}_a \underline{Z} - \underline{n} \underline{I}_B \underline{Z} + \underline{n} \underline{I}_c \underline{Z}. \quad (3.32)$$

Заменим комплекс $\underline{n} = -n$:

$$-n \underline{I}_a \underline{Z} + n \underline{I}_B \underline{Z} - n \underline{I}_c \underline{Z} = \underline{U}. \quad (3.33)$$

Решаем систему уравнений (3.11), (3.31), (3.33) относительно токов трёхфазной нагрузки \underline{I}_a , \underline{I}_B , \underline{I}_c , применяя матричный метод [28].

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a + \underline{I}_B + \underline{I}_c &= 0, \\ \left(1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} \right) \underline{I}_a - \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} \underline{I}_B - \left(1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2} \right) \underline{I}_c &= 0, \\ -n \underline{I}_a \underline{Z} + n \underline{I}_B \underline{Z} - n \underline{I}_c \underline{Z} &= \underline{U}. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Решение системы уравнений (3.34) приведено в приложении В:

$$\underline{I}_a = \frac{U}{2n\underline{Z}} \frac{\underline{Z} \underline{Z}_2 - \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - 2\underline{Z} \underline{Z}_1}{\underline{A}}; \quad (3.35)$$

$$\underline{I}_B = \frac{U}{2n\underline{Z}} \frac{2\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z} \underline{Z}_2 + 4\underline{Z} \underline{Z}_1}{\underline{A}}; \quad (3.36)$$

$$\underline{I}_c = -\frac{U}{2n\underline{Z}} \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + 2\underline{Z} \underline{Z}_2 + 2\underline{Z} \underline{Z}_1}{\underline{A}}. \quad (3.37)$$

где $\underline{A} = 2\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + 4\underline{Z} \underline{Z}_1 + \underline{Z} \underline{Z}_2$.

Проверка результатов решения системы уравнений (3.34) по уравнению (3.11):

$$\underline{I}_a + \underline{I}_B + \underline{I}_c = 0; \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z} \underline{Z}_2 - \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - 2\underline{Z} \underline{Z}_1 + 2\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z} \underline{Z}_2 + \\ + 4\underline{Z} \underline{Z}_1 - \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - 2\underline{Z} \underline{Z}_2 - 2\underline{Z} \underline{Z}_1 = 0. \end{aligned} \quad (3.39)$$

3.4 Определение параметров симметрирующих элементов ТПЧФ-2

Разложим систему уравнений (3.35) – (3.37) на симметричные составляющие и определим комплексный коэффициент обратной последовательности по току

$$\underline{K}_{2i} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1}.$$

Вектор токов в системе симметричных координат [28]:

$$[\underline{I}_S] = [\underline{S}]^{-1} [\underline{I}]; \quad (3.40)$$

Где:

$$[\underline{I}_S] = \begin{Bmatrix} \underline{I}_{1c} \\ \underline{I}_{2c} \\ \underline{I}_{0c} \end{Bmatrix}; \quad (3.41)$$

матрица, обратная матрице системы симметричных координат:

$$[\underline{S}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix}. \quad (3.42)$$

На основании (3.40) имеем:

$$\begin{pmatrix} I_{1c} \\ I_{2c} \\ I_{0c} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{U}{2n\underline{Z}} \begin{pmatrix} \frac{\underline{Z}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{\underline{A}} \\ \frac{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1}{\underline{A}} \\ \frac{\underline{A}}{-\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_1} \end{pmatrix}; \quad (3.43)$$

где $\underline{A} = 2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1 + \underline{Z}\underline{Z}_2$.

Определим $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ при которых система уравнений (3.35) – (3.37) будет симметричной. С этой целью приравняем коэффициент обратной последовательности токов $\underline{K}_{2i} = 0$ при $\underline{I}_{2c} = 0$, так как ток нулевой последовательности \underline{I}_{0c} в цепи (рисунок 3.1) ТПЧФ-2 отсутствует:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{2c} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{U}{\underline{A}2n\underline{Z}} [\underline{Z}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_2 + \underline{a}^2(2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1) - \\ &\quad - \underline{a}(\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_1)] = \\ &= \frac{U}{6\underline{A}n\underline{Z}} [\underline{Z}\underline{Z}_2(1 + \underline{a}^2 - 2\underline{a}) + \underline{Z}_1\underline{Z}_2(-1 + 2\underline{a}^2 - \underline{a}) + \underline{Z}\underline{Z}_1(-2 + 4\underline{a}^2 - 2\underline{a})] = \\ &= \frac{U}{6\underline{A}n\underline{Z}} [\underline{Z}\underline{Z}_2(1 + \underline{a}^2 - 2\underline{a}) + \underline{Z}_1\underline{Z}_2(-1 + 2\underline{a}^2 - \underline{a}) + \\ &\quad + 2\underline{Z}\underline{Z}_1(-1 + 2\underline{a}^2 - \underline{a})]; \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$1 + \underline{a}^2 - 2\underline{a} = \frac{3}{2}(1 - j\sqrt{3}); \quad (3.45)$$

$$2\underline{a}^2 - \underline{a} - 1 = \frac{3}{2}(-1 - j\sqrt{3}). \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{2c} &= \frac{U}{6\underline{A}n\underline{Z}} \left[\underline{Z}\underline{Z}_2 \frac{3}{2}(1 - j\sqrt{3}) + \underline{Z}_1\underline{Z}_2 \frac{3}{2}(-1 - j\sqrt{3}) + 2\underline{Z}\underline{Z}_1 \frac{3}{2}(-1 - j\sqrt{3}) \right] = \\ &= \frac{U}{4\underline{A}n\underline{Z}} [\underline{Z}\underline{Z}_2(1 - j\sqrt{3}) + \underline{Z}_1\underline{Z}_2(-1 - j\sqrt{3}) + 2\underline{Z}\underline{Z}_1(-1 - j\sqrt{3})]. \end{aligned} \quad (3.47)$$

Так как $\underline{I}_{2c} = 0$, приравняем квадратную скобку [] (3.47) к нулю:

$$\underline{Z}\underline{Z}_2(1 - j\sqrt{3}) + \underline{Z}_1\underline{Z}_2(-1 - j\sqrt{3}) + 2\underline{Z}\underline{Z}_1(-1 - j\sqrt{3}) = 0; \quad (3.48)$$

Заменяем в (3.48):

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= -jx_1 \\ \underline{Z}_2 &= -jx_2 \\ \underline{Z} &= R + jx \end{aligned} \right\} \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} (R + jx)(-jx_2)(1 - j\sqrt{3}) + (-jx_1)(-jx_2)(-1 - j\sqrt{3}) + \\ + 2(R + jx)(-jx_1)(-1 - j\sqrt{3}) = 0; \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} -jx_2R - \sqrt{3}x_2R + x_2x - j\sqrt{3}x_2x + x_1x_2 + j\sqrt{3}x_1x_2 + j2Rx_1 - \sqrt{3}2Rx_1 - \\ - 2xx_1 - j\sqrt{3}2xx_1 = 0. \end{aligned} \quad (3.51)$$

Приравниваем к нулю отдельно вещественную часть и отдельно мнимую часть уравнения (3.51):

$$\sqrt{3}x_2R + x_2x + x_1x_2 - 2\sqrt{3}Rx_1 - 2xx_1 = 0; \quad (3.52)$$

$$x_2R - \sqrt{3}x_2x + \sqrt{3}x_1x_2 + 2Rx_1 - \sqrt{3}2xx_1 = 0. \quad (3.53)$$

Умножаем первое уравнение на $\sqrt{3}$ и вычитаем из первого уравнения второе:

$$3x_2R + \sqrt{3}x_2x + \sqrt{3}x_1x_2 - 6Rx_1 - 2\sqrt{3}xx_1 = 0; \quad (3.54)$$

$$x_2R - \sqrt{3}x_2x + \sqrt{3}x_1x_2 + 2Rx_1 - \sqrt{3}2xx_1 = 0; \quad (3.55)$$

$$-2x_2R + 2\sqrt{3}x_2x - 8Rx_1 = 0; \quad (3.56)$$

$$x_2R + \sqrt{3}x_2x - 4Rx_1 = 0; \quad (3.57)$$

$$x_2(-R + \sqrt{3}x) = 4Rx_1; \quad (3.58)$$

$$x_1 = \frac{x_2(-R + \sqrt{3}x)}{4R}. \quad (3.59)$$

Подставим (3.59) в уравнение (3.53) и решим его относительно x_2 :

$$-x_2R - \sqrt{3}x_2x + \sqrt{3}x_1x_2 + 2Rx_1 - 2\sqrt{3}xx_1 = 0; \quad (3.60)$$

$$x_1 = \frac{x_2(-R + \sqrt{3}x)}{4R}; \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} -R - \sqrt{3}x + \sqrt{3} \cdot \frac{x_2(-R + \sqrt{3}x)}{4R} + \\ + 2R \cdot \frac{(-R + \sqrt{3}x)}{4R} - 2\sqrt{3}x \cdot \frac{(-R + \sqrt{3}x)}{4R} = 0; \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned}
& -R - \sqrt{3}x + \frac{\sqrt{3}x_2(-R + \sqrt{3}x)}{4R} + \\
& + \frac{2R(-R + \sqrt{3}x)}{4R} - \frac{2\sqrt{3}x(-R + \sqrt{3}x)}{4R} = 0;
\end{aligned} \tag{3.63}$$

$$\begin{aligned}
& (-R - \sqrt{3}x)4R + \sqrt{3}x_2(-R + \sqrt{3}x) + \\
& + 2R(-R + \sqrt{3}x) - 2\sqrt{3}x(-R + \sqrt{3}x) = 0;
\end{aligned} \tag{3.64}$$

$$\begin{aligned}
\sqrt{3}x_2(\sqrt{3}x - R) &= 2[2R^2 + 2\sqrt{3}Rx + R^2 - \sqrt{3}Rx - \sqrt{3}Rx + 3x^2] = \\
&= 2[3R^2 + 3x^2] = 6(R^2 + x^2);
\end{aligned} \tag{3.65}$$

$$\sqrt{3}x_2(\sqrt{3}x - R) = 6(R^2 + x^2); \tag{3.66}$$

$$x_2(\sqrt{3}x - R) = 2\sqrt{3}(R^2 + x^2); \tag{3.67}$$

$$x_2 = \frac{2\sqrt{3}(R^2 + x^2)}{\sqrt{3}x - R}. \tag{3.68}$$

Подставим (3.68) в формулу (3.59), получаем:

$$x_1 = \frac{\sqrt{3}(R^2 + x^2)}{2R}; \tag{3.69}$$

В формулах (3.68) и (3.69) заменим $R = Z \cos \varphi$ и $x = Z \sin \varphi$:

$$x_1 = \frac{\sqrt{3}(Z^2 \cos^2 \varphi + Z^2 \sin^2 \varphi)}{2Z \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3}Z^2}{2Z \cos \varphi}; \tag{3.70}$$

$$x_1 = \frac{\sqrt{3}Z^2}{2Z \cos \varphi}; \tag{3.71}$$

$$\begin{aligned}
x_2 &= \frac{2\sqrt{3}(Z^2 \cos^2 \varphi + Z^2 \sin^2 \varphi)}{\sqrt{3}Z \sin \varphi - Z \cos \varphi} = \frac{2\sqrt{3}Z^2}{Z(\sqrt{3} \sin \varphi - \cos \varphi)} = \\
&= \frac{2\sqrt{3}Z}{\sqrt{3} \sin \varphi - \cos \varphi} = \frac{2\sqrt{3}Z}{2\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi\right)} = \\
&= \frac{\sqrt{3}Z}{\cos 30^\circ \sin \varphi - \sin 30^\circ \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3}Z}{\sin(\varphi - 30^\circ)};
\end{aligned} \tag{3.72}$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{3}Z}{\sin(\varphi - 30^\circ)}. \tag{3.73}$$

Из формулы (3.71) видно, что при изменении угла φ нагрузки в диапазоне от 0° до 90° симметрирующий элемент x_1 имеет ёмкостной характер. Второй симметрирующий элемент x_2 формула (3.44) при φ от 31° до 90° имеет ёмкостной характер.

Определим из формул (3.71), (3.73) ёмкости конденсаторных батарей:

$$x_1 = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{\sqrt{3}Z}{2 \cos \varphi}; \quad (3.74)$$

откуда:

$$C_1 = \frac{2 \cos \varphi}{\omega \sqrt{3}Z}. \quad (3.75)$$

Из выражений для токов трёхфазной симметричной нагрузки (3.88) – (3.92) модуль тока $I_H = I_a = I_b = I_c = \frac{U}{2nZ}$, откуда:

$$Z = \frac{U}{2nI_H}; \quad (3.76)$$

Подставляем Z в (3.75), получаем:

$$C_1 = \frac{2 \cos \varphi 2nI_H}{\omega \sqrt{3}U} = \frac{4nI_H \cos \varphi}{\omega \sqrt{3}U}; \quad (3.77)$$

Базисная ёмкость C_6 при $\varphi = 30^\circ$ и $I_H = I_{H(\text{НОМ})}$:

$$C_6 = \frac{4nI_{H(\text{НОМ})} \sqrt{3}}{2\sqrt{3}U\omega} = \frac{2nI_{H(\text{НОМ})}}{U\omega}; \quad (3.78)$$

Относительная ёмкость:

$$C_1^* = \frac{C_1}{C_6} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_H}{I_{H(\text{НОМ})}} \cos \varphi; \quad (3.79)$$

Ёмкости второй конденсаторной батареи:

$$x_2 = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{\sqrt{3}Z}{\sin(\varphi - 30^\circ)} = \frac{\sqrt{3}U}{2nI_H \sin(\varphi - 30^\circ)}; \quad (3.80)$$

$$C_2 = \frac{\sin(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}Z\omega} = \frac{2nI_H \sin(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}U\omega}; \quad (3.81)$$

$$C_2^* = \frac{C_2}{C_6} = \frac{\sin(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_H}{I_{H(\text{НОМ})}}. \quad (3.82)$$

Реактивные мощности конденсаторных батарей:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= U_1^2 \omega C_1 \\ Q_2 &= U_2^2 \omega C_2 \end{aligned} \right\}; \quad (3.83)$$

Из (3.128), (3.130) $U_1 = U_2 = \frac{\sqrt{3}U}{2n}$; из (3.76) $U = 2U_\phi n$.

Тогда:

$$Q_1 = 2\sqrt{3}U_\phi I_H \cos \varphi = \frac{2 \cdot 3U_\phi I_H \cos \varphi}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} S_H \cos \varphi; \quad (3.84)$$

где $S_H = 3U_\phi I_H$ – полная мощность трёхфазной симметричной нагрузки.

$$Q_2 = \sqrt{3}U_\phi I_H \sin(\varphi - 30^\circ) = \frac{3U_\phi I_H \sin(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}} = \frac{S_H}{\sqrt{3}} \sin(\varphi - 30^\circ). \quad (3.85)$$

3.5 Определение токов трансформаторного преобразователя числа фаз

ТПЧФ-2

В математических выражениях (3.35) – (3.37) комплексные токи трёхфазной симметричной нагрузки выражены через комплексные сопротивления нагрузки \underline{Z} и симметрирующих элементов \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 . Определим эти токи через модули сопротивлений нагрузки R , x и симметрирующих элементов x_1 и x_2 :

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z} &= R + jx; \\ \underline{Z}_1 &= -jx_1; \\ \underline{Z}_2 &= -jx_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.86)$$

Комплексный ток \underline{I}_a (3.35):

$$\underline{I}_a = \frac{U}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{\underline{Z}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1 + \underline{Z}\underline{Z}_2} = \frac{U}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{G}{A}. \quad (3.87)$$

Дальнейшие преобразования представлены в приложении Б. После преобразований имеем:

$$\underline{I}_a = \frac{U}{2nZ} e^{j(120^\circ - \varphi)}; \quad (3.88)$$

Комплексный ток \underline{I}_b (3.36):

$$\underline{I}_b = \frac{U}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1 + \underline{Z}\underline{Z}_2} = \frac{U}{2n\underline{Z}} = \frac{U}{2nZe^{j\varphi}}; \quad (3.89)$$

$$\underline{I}_b = \frac{U}{2nZ} e^{-j\varphi}; \quad (3.90)$$

Комплексный ток \underline{I}_c (3.37):

$$\underline{I}_c = \frac{U}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{-(\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_1)}{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1 + \underline{Z}\underline{Z}_2}. \quad (3.91)$$

Дальнейшие преобразования представлены в приложении В. После преобразований имеем:

$$\underline{I}_c = \frac{U}{2nZ} e^{-j(120^\circ + \varphi)}. \quad (3.92)$$

Токи симметрирующих элементов ТПЧФ-2 определяются по формулам (3.27) и (3.28).

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{I}_a - \underline{I}_b)\underline{Z}}{\underline{Z}_1}; \quad (3.93)$$

После преобразований, представленных в приложении В, имеем:

$$\underline{I}_1 = \frac{U \cos \varphi}{nZ_1} e^{-j120^\circ}; \quad (3.94)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{(\underline{I}_c - \underline{I}_a)\underline{Z}}{\underline{Z}_2}. \quad (3.95)$$

После преобразований, представленных в приложении В, имеем:

$$\underline{I}_2 = \frac{U \sin(\varphi - 30^\circ)}{2nZ_2}. \quad (3.96)$$

Комплексные токи во вторичных обмотках трансформатора ТПЧФ-2 $\underline{I}'_a, \underline{I}'_b, \underline{I}'_c$

Ток \underline{I}'_a из уравнения (3.12):

$$\underline{I}'_a = \underline{I}_a + \underline{I}_1 - \underline{I}_2. \quad (3.97)$$

\underline{I}_a представлен выражением (В.24):

$$\underline{I}_a = -\frac{U}{2n\underline{Z}} \frac{[(\sqrt{3}x + R) + j(x - \sqrt{3}R)]}{2(R + jx)}; \quad (3.98)$$

\underline{I}_1 см. выражение (В.42):

$$\underline{I}_1 = -\frac{\sqrt{3}U}{4n\underline{Z}\underline{Z}_1} [(\sqrt{3}R + x) + j(\sqrt{3}x - R)]; \quad (3.99)$$

\underline{I}_2 см. выражение (3.51):

$$\underline{I}_2 = -\frac{\sqrt{3}U}{2n\underline{Z}\underline{Z}_2} (-x + jR); \quad (3.100)$$

Подставим выражение токов $\underline{I}_a, \underline{I}_1, \underline{I}_2$ в уравнение (3.12), после преобразования, получим:

$$\underline{I}'_a = -\frac{U}{4n\underline{Z} Z^2} [(R^2 + x^2) + R(R + jx)(1 + j\sqrt{3})]; \quad (3.101)$$

Ток \underline{I}'_b из уравнения (3.13):

$$\underline{I}'_b = \underline{I}_b - \underline{I}_1; \quad (3.102)$$

\underline{I}_b представлено выражением (B.27), а \underline{I}_1 выражением (B.42):

$$\underline{I}_b = \frac{U}{2n\underline{Z}} = \frac{U}{2nZ} e^{-j\varphi}; \quad (3.103)$$

После подстановки \underline{I}_b и \underline{I}_1 в уравнение (3.13), получим:

$$\underline{I}'_b = \frac{U}{2n\underline{Z} Z^2} [R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) + (R^2 + x^2)]. \quad (3.104)$$

Ток \underline{I}'_c из уравнения (3.14):

$$\underline{I}'_c = \underline{I}_c + \underline{I}_2; \quad (3.105)$$

\underline{I}_c представлено выражением (B.36), а \underline{I}_2 выражением (B.51):

$$\underline{I}_c = -\frac{U}{2nZ} \cdot \frac{(R - \sqrt{3}x) + j(x + \sqrt{3}R)}{2(R + jx)}; \quad (3.106)$$

После подстановки \underline{I}_c и \underline{I}_2 в уравнение (3.14), получим:

$$\underline{I}'_c = -\frac{U}{4n\underline{Z} Z^2} [(R^2 + x^2) + R(R + jx)(1 + j\sqrt{3})]. \quad (3.107)$$

Из сравнения выражений (3.101) и (3.107) видим, что $\underline{I}'_c = \underline{I}'_a$.

Проверка правильности определения $\underline{I}'_a, \underline{I}'_b, \underline{I}'_c$ по уравнению $\underline{I}'_a + \underline{I}'_b + \underline{I}'_c = 0$:

$$\begin{aligned} & 2(R^2 + x^2) + 2R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) - \\ & - 2(R^2 + x^2) - 2R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) = 0. \end{aligned} \quad (3.108)$$

Переведем комплексы токов $\underline{I}'_a, \underline{I}'_b, \underline{I}'_c$ из алгебраической в тригонометрическую форму:

$$\underline{I}'_a = \underline{I}'_c = -\frac{U}{2nZ} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)] = \frac{U}{4nZ} [2 \cos \varphi e^{-j120^\circ} - e^{-j\varphi}]; \quad (3.109)$$

$$\underline{I}'_b = \frac{U}{nZ} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)] = \frac{U}{2nZ} [e^{-j\varphi} - 2 \cos \varphi e^{-j120^\circ}]. \quad (3.110)$$

Комплексные токи в первичных обмотках трансформатора ТПЧФ-2 $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$.

Из уравнения (3.16) с учетом равенства (3.15) имеем:

$\underline{I}'_a - \underline{I}'_b = \underline{I}_A n - \underline{I}_B n = 2\underline{I}n$, откуда:

$$\underline{I} = \frac{\underline{I}_A - \underline{I}_B}{2} = \frac{\underline{I}'_a - \underline{I}'_b}{2}. \quad (3.111)$$

Определим $\underline{I}'_a - \underline{I}'_b$ с учетом (3.101), (3.104):

$$\begin{aligned} \underline{I}'_b - \underline{I}'_a = \frac{U}{2n\underline{Z}Z^2} \{ & R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) + (R^2 + x^2) + \\ & + \frac{1}{2} [(R^2 + x^2) + R(R + jx)(1 + j\sqrt{3})] \}; \end{aligned} \quad (3.112)$$

$$\begin{aligned} \{ \} = \frac{2[R(R+jx)(1+j\sqrt{3})+(R^2+x^2)]+[R(R+jx)(1+j\sqrt{3})+(R^2+x^2)]}{2} = \\ = \frac{3}{2} [R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) + (R^2 + x^2)]; \end{aligned} \quad (3.113)$$

$$\underline{I}'_b - \underline{I}'_a = \frac{3U}{4n\underline{Z}Z^2} [R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) + (R^2 + x^2)]; \quad (3.114)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{I}'_a - \underline{I}'_b}{2n} = \frac{3U}{8n^2\underline{Z}Z^2} [R(R + jx)(1 + j\sqrt{3}) + (R^2 + x^2)]; \quad (3.115)$$

$$\underline{I} = \frac{3U}{8n^2Z} 2[\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)] = \frac{3U}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)]; \quad (3.116)$$

$$\underline{I} = \frac{3U}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)]; \quad (3.117)$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_C = \underline{I} = \frac{3U}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)]; \quad (3.118)$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I} = -\frac{3U}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)]. \quad (3.119)$$

В таблице 3.1 приведены результаты расчёта токов и ёмкостей ТПЧФ-2 в зависимости от угла φ нагрузки. По данным, приведённым в таблице 3.1 на рисунках 3.2 и 3.3 построены соответствующие зависимости.

Таблица 3.1 – Результаты расчёта токов и ёмкостей ТПЧФ-2 в зависимости от угла φ нагрузки при $n = 1,0, I_H = I_{H(\text{НОМ})}$

Физическая величина	Ед. измерения	Результаты расчётов						
		0	10	20	30	40	50	60
φ	град.	0	10	20	30	40	50	60
$I_a = I_b = I_c$	о.е.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$I'_a = I'_c$	о.е.	1,32	1,25	1,14	1,0	0,84	0,67	0,5
I'_b	о.е.	2,64	2,5	2,28	2,0	1,68	1,34	1,0
$I_A = I_B = I_C = I$	о.е.	1,98	1,88	1,71	1,5	1,26	1,0	0,75
I_1	о.е.	2,0	1,97	1,88	1,73	1,53	1,29	1,0
I_2	о.е.	-0,5	-0,34	0,174	0	0,174	0,34	0,5
C_1	о.е.	1,15	1,14	1,08	1,0	0,88	0,74	0,58
C_2	о.е.	-0,29	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,29

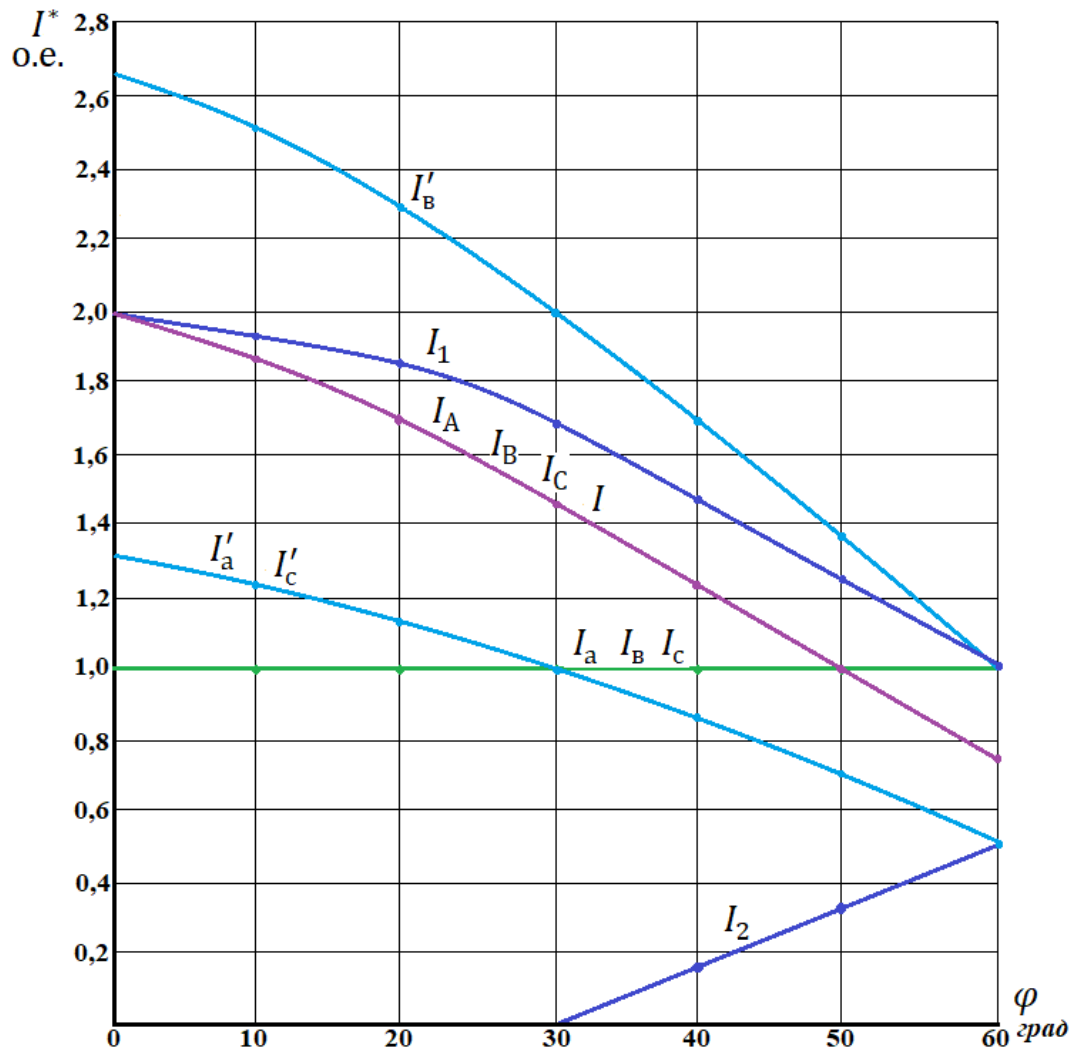


Рисунок 3.2 – Зависимости токов ТПЧФ-2 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H =$

$I_{\text{ном}}$

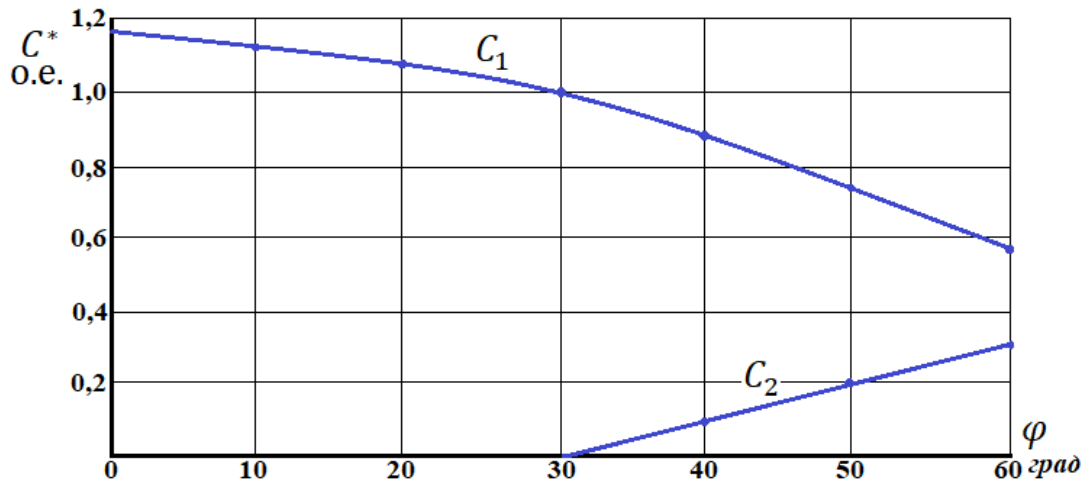


Рисунок 3.3 – Зависимости параметров симметрирующих элементов ТПЧФ-2 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{\text{НОМ}}$

3.6 Напряжения трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2

Фазные напряжения трёхфазного симметричного приёмника в соответствии с равенствами (3.5):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{I}_a \underline{Z} \\ \underline{U}_b &= \underline{I}_b \underline{Z} \\ \underline{U}_c &= \underline{I}_c \underline{Z} \end{aligned} \right\}; \quad (3.120)$$

Токи трёхфазного приёмника определяются формулами (3.88), (3.90), (3.92):

$$\underline{I}_a = \frac{U}{2nZ e^{j\varphi}} e^{j120^\circ} = \frac{U}{2n\underline{Z}} e^{j120^\circ}; \quad (3.121)$$

$$\underline{I}_b = \frac{U}{2nZ e^{j\varphi}} = \frac{U}{2n\underline{Z}}; \quad (3.122)$$

$$\underline{I}_c = \frac{U}{2nZ e^{j\varphi}} e^{-j120^\circ} = \frac{U}{2n\underline{Z}} e^{-j120^\circ}. \quad (3.123)$$

Подставляем \underline{I}_a , \underline{I}_b , \underline{I}_c в равенства \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \frac{U}{2n} e^{j120^\circ} = \underline{U}'_a \\ \underline{U}_b &= \frac{U}{2n} = \underline{U}'_b \\ \underline{U}_c &= \frac{U}{2n} e^{-j120^\circ} = \underline{U}'_c \end{aligned} \right\}; \quad (3.124)$$

Напряжения на первичных обмотках трансформатора \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C в соответствии с равенствами (3.5):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= n\underline{U}_a = ne^{j180^\circ} \cdot \frac{U}{2n} e^{j120^\circ} = \frac{U}{2} e^{-j60^\circ}; \\ \underline{U}_B &= n\underline{U}_B = ne^{j180^\circ} \cdot \frac{U}{2n} = \frac{U}{2} e^{j180^\circ} = -\frac{U}{2}; \\ \underline{U}_C &= n\underline{U}_c = ne^{j180^\circ} \cdot \frac{U}{2n} e^{-j120^\circ} = \frac{U}{2} e^{j60^\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (3.125)$$

Напряжение на входе ТПЧФ-2 U по уравнению (3.6):

$$\underline{U} = \underline{U}_A - \underline{U}_B + \underline{U}_C = \frac{U}{2} (e^{-j60^\circ} + 1 + e^{j60^\circ}) = U. \quad (3.126)$$

Из уравнения (3.125) $U = 2U_B$.

Напряжение симметрирующих элементов:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_a - \underline{U}_B = \frac{U}{2n} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right) = \frac{\sqrt{3}U}{2n} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right); \quad (3.127)$$

$$\underline{U}_1 = \frac{\sqrt{3}U}{2n} e^{j150^\circ}; \quad (3.128)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_c - \underline{U}_a = \frac{U}{2n} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \quad (3.129)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\sqrt{3}U}{2n} e^{-j90^\circ}. \quad (3.130)$$

3.7 Построение векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-2

при $\varphi = 0$, $n = 1$, 0 , $I_H = I_{H(\text{НОМ})}$

Примем базисные значения напряжения $U_6 = \frac{U}{2n}$, тока $I_6 = I_{H(\text{НОМ})} = \frac{U}{2nZ e^{j\varphi}} = \frac{U e^{-j\varphi}}{2nZ_{\text{НОМ}}}$.

Переводим фазные напряжения трёхфазного приёмника \underline{U}_a , \underline{U}_B , \underline{U}_c (3.124) в относительные единицы измерения делением их на U_6 :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a^* &= \frac{\underline{U}_a}{U_6} = 1 \cdot e^{j120^\circ} = 1 \cdot \underline{a} \\ \underline{U}_B^* &= 1 \\ \underline{U}_c^* &= 1 \cdot \underline{a}^2 \text{ о. е.} \end{aligned} \right\} \quad (3.131)$$

Таким же образом определяем относительные напряжения симметрирующих элементов \underline{U}_1 и \underline{U}_2 (3.128), (3.130):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1^* &= \frac{U_1}{U_6} = \sqrt{3}e^{j150^\circ} \text{ о. е.} = \underline{U}_{\text{ав}}^* \\ \underline{U}_2^* &= \sqrt{3}e^{-j90^\circ} \text{ о. е.} = \underline{U}_{\text{са}}^* \end{aligned} \right\} \quad (3.132)$$

Определяем длину векторов напряжения на комплексной плоскости путём деления напряжений в относительных единицах на масштаб напряжения $m_U = 0,2$:

$$\underline{U}_a^* = \underline{U}_b^* = \underline{U}_c^* = \frac{U_a^*}{m_U} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ см}; \quad (3.133)$$

$$\underline{U}_1^* = \underline{U}_2^* = \frac{U_1^*}{m_U} = \frac{\sqrt{3}}{0,2} = \frac{1,73}{0,2} = 8,66 \text{ см}; \quad (3.134)$$

Диаграмму напряжений строим на общей векторной диаграмме (рисунок 3.4).

Комплексные токи трёхфазной симметричной нагрузки $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ строим по формулам (3.88), (3.90), (3.92), а токи симметрирующих элементов $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ по формулам (3.94), (3.96):

$$\underline{I}_a^* = \frac{I_a}{I_6} = 1 \cdot e^{j120^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.135)$$

$$\frac{\underline{I}_a^*}{m_I} = \frac{1}{0,2} e^{j120^\circ} = 5e^{j120^\circ} \text{ см}; \quad (3.136)$$

$$\underline{I}_b^* = \frac{I_b}{I_6} = 1 \text{ о. е.}; \quad (3.137)$$

$$\frac{\underline{I}_b^*}{m_I} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ см}; \quad (3.138)$$

$$\underline{I}_c^* = \frac{I_c}{I_6} = 1 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.139)$$

$$\frac{\underline{I}_c^*}{m_I} = \frac{1}{0,2} e^{-j120^\circ} = 5e^{-j120^\circ} \text{ см}; \quad (3.140)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{U \cos \varphi e^{-j120^\circ}}{nZ} = \frac{2U \cos \varphi e^{-j120^\circ}}{2nZ}; \quad (3.141)$$

$$\underline{I}_1^* = \frac{I_1}{I_6} = 2 \cos \varphi e^{-j120^\circ}. \quad (3.142)$$

При $\varphi = 0$:

$$\underline{I}_1^* = 2e^{-j120^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.143)$$

$$\frac{I_1^*}{m_I} = 10e^{-j120^\circ} \text{ см}; \quad (3.144)$$

$$I_2 = \frac{U}{2nZ} \sin(\varphi - 30^\circ); \quad (3.145)$$

$$I_2^* = 1 \cdot \sin(\varphi - 30^\circ) = -0,5 \text{ о. е. (индуктивность)}; \quad (3.146)$$

$$\frac{I_2^*}{m_I} = -2,5 \text{ см}. \quad (3.147)$$

Комплексные токи во вторичных обмотках трансформатора I'_a, I'_b, I'_c строим по формулам (3.109), (3.110), а токи в первичных обмотках трансформатора I_A, I_B, I_C по формулам (3.118), (3.119):

$$I_a^* = I_c^* = - \left[1 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = [-1 - j0,866] = 1,32e^{-j139^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.148)$$

$$\frac{I_a^*}{m_I} = \frac{1,32}{0,2} e^{-j139^\circ} = 6,6e^{-j139^\circ} \text{ см}; \quad (3.149)$$

$$I_b^* = [2 + j1,73] = 2,64e^{j41^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.150)$$

$$\frac{I_b^*}{m_I} = 13,2e^{j41^\circ} \text{ см}; \quad (3.151)$$

$$I_A^* = I_C^* = I^* = \frac{3}{2} \left[1 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = \frac{3}{2} [1 + j0,866] = 2e^{j41^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.152)$$

$$\frac{I_A^*}{m_I} = \frac{2}{0,2} e^{j41^\circ} = 10e^{j41^\circ} \text{ см}; \quad (3.153)$$

$$I_B^* = -I_C^* = \frac{3}{2} \left[-1 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = 2e^{-j139^\circ} \text{ о. е.}; \quad (3.154)$$

$$\frac{I_B^*}{m_I} = \frac{2}{0,2} e^{-j139^\circ} = 10e^{-j139^\circ} \text{ см}. \quad (3.155)$$

На векторной диаграмме (рисунок 3.4) выполняются уравнения для напряжений (3.6) и для токов (3.18), что подтверждает правильность решения системы уравнений для ТПЧФ-2.

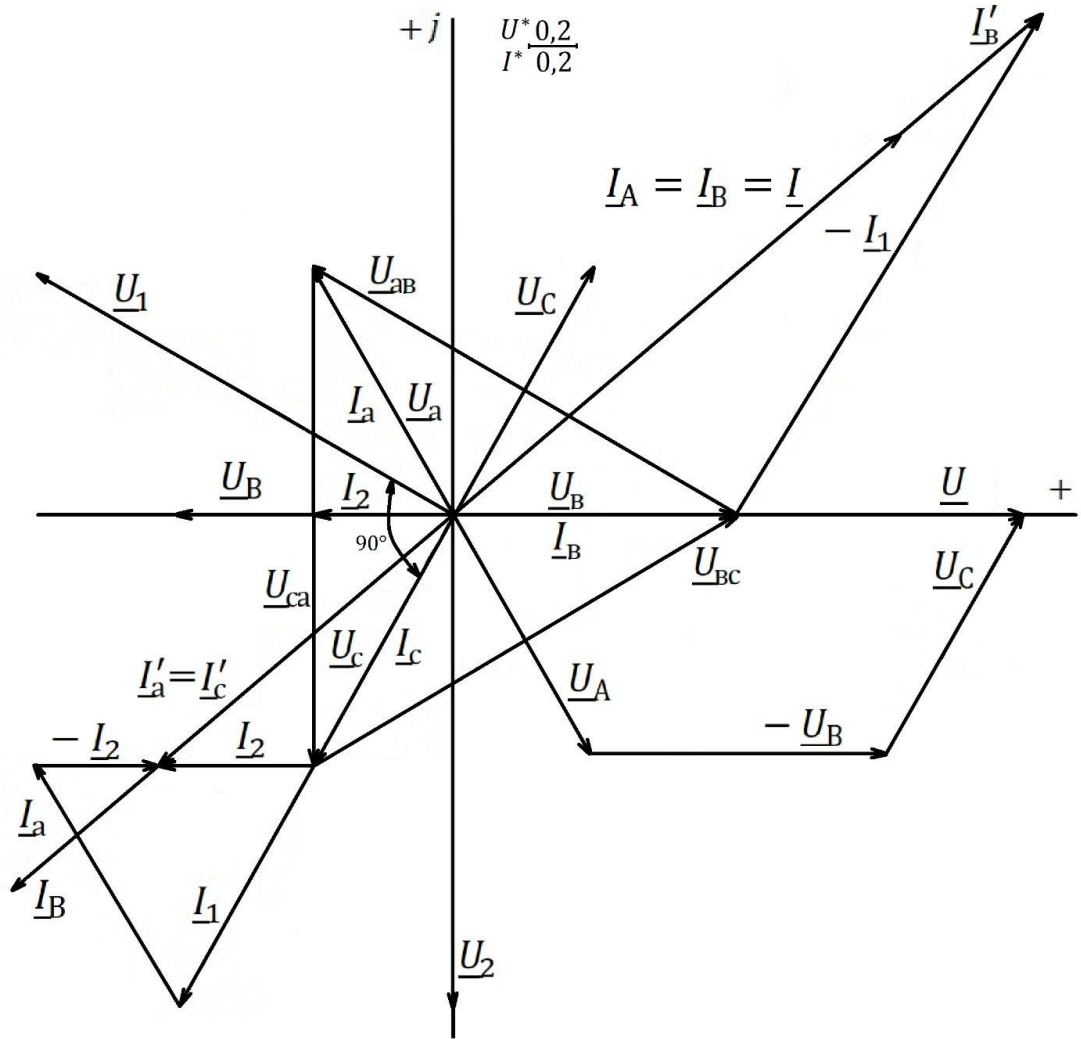


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма для ТПЧФ-2 при $\varphi = 0$, $n = 1,0$, $I_H = I_{H(\text{ном})}$

3.8 Мощности ТПЧФ-2

Мощность трёхфазной нагрузки:

$$\begin{aligned}
 \underline{S}_H &= \underline{U}_a I_a^* + \underline{U}_b I_b^* + \underline{U}_c I_c^* = \frac{U}{2n} e^{j120^\circ} \cdot \frac{U}{2nZ} e^{-j(120^\circ - \varphi)} + \frac{U}{2n} \cdot \frac{U}{2nZ} e^{j\varphi} + \\
 &+ \frac{U}{2n} e^{-j120^\circ} \cdot \frac{U}{2nZ} e^{j(120^\circ + \varphi)} = \frac{3U^2}{4n^2Z} e^{j\varphi} = \\
 &= \frac{3U^2}{4n^2Z} \cos \varphi + j \frac{3U^2}{4n^2Z} \sin \varphi ; \tag{3.156}
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_H &= \frac{3U^2}{4n^2Z}; \\ P_H &= \frac{3U^2 \cos \varphi}{4n^2Z}; \\ Q_H &= \frac{3U^2 \sin \varphi}{4n^2Z}. \end{aligned} \right\} \quad (3.157)$$

Мощность ТПЧФ-2:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U} \cdot \underline{I}^* = \frac{3U^2}{4n^2Z} [\cos \varphi - j \sin(60^\circ - \varphi)] = \\ &= \frac{3U^2 \cos \varphi}{4n^2Z} - j \frac{3U^2}{4n^2Z} \sin(60^\circ - \varphi); \end{aligned} \quad (3.158)$$

$$P = \frac{3U^2 \cos \varphi}{4n^2Z}; \quad (3.159)$$

$$Q = -\frac{3U^2 \sin(60^\circ - \varphi)}{4n^2Z}; \quad (3.160)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{Q}{P} = -\frac{3U^2 \sin(60^\circ - \varphi)}{3U^2 \cos \varphi} = -\frac{\sin(60^\circ - \varphi)}{\cos \varphi} = \\ &= -\frac{\sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} = -\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{tg} \varphi; \end{aligned} \quad (3.161)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (3.162)$$

Мощность первого симметрирующего элемента:

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \frac{\sqrt{3}U}{2n} e^{j150^\circ} \cdot \frac{U \cos \varphi}{nZ} e^{j120^\circ} = \frac{\sqrt{3}U^2 \cos \varphi}{2n^2Z} e^{-j90^\circ}; \quad (3.163)$$

$$Q_1 = \frac{\sqrt{3}U^2 \cos \varphi}{2n^2Z}. \quad (3.164)$$

Мощность второго симметрирующего элемента:

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = \frac{\sqrt{3}U}{2n} e^{-j90^\circ} \cdot \frac{U \sin(\varphi - 30^\circ)}{2nZ} = \frac{\sqrt{3}U^2 \sin(\varphi - 30^\circ)}{4n^2Z} e^{-j90^\circ}; \quad (3.165)$$

$$Q_2 = \frac{\sqrt{3}U^2 \sin(\varphi - 30^\circ)}{4n^2Z}. \quad (3.166)$$

Баланс мощностей:

$$\underline{S} = \underline{S}_H + \underline{S}_1 + \underline{S}_2 =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3U^2 \cos \varphi}{4n^2 Z} + j \frac{3U^2 \sin \varphi}{4n^2 Z} - j \frac{\sqrt{3}U^2 \cos \varphi}{2n^2 Z} - -j \frac{\sqrt{3}U^2 \sin(\varphi - 30^\circ)}{4n^2 Z} = \\
&= \frac{3U^2 \cos \varphi}{4n^2 Z} + j \frac{3U^2}{4n^2 Z} [\sqrt{3} \sin \varphi - 2 \cos \varphi - \sin(\varphi - 30^\circ)] = \\
&= \frac{3U^2 \cos \varphi}{4n^2 Z} - j \frac{3U^2 \sin(60^\circ - \varphi)}{4n^2 Z}; \quad (3.167)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[] &= \sqrt{3} \sin \varphi - 2 \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi + \frac{1}{2} \cos \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{3}{2} \cos \varphi = \\
&= -\sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right) = -\sqrt{3} \sin(60^\circ - \varphi). \quad (3.168)
\end{aligned}$$

Результаты вычислений приведённых в главе 3 сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Математические выражения для расчёта трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2 с конденсаторными батареями на низкой стороне трансформатора

Название физической величины	№ п/п	Формула	Номер формулы в тексте
1	2	3	4
Напряжение на первичных обмотках трансформатора	1	По оси вещественных направлен вектор однофазного напряжения $\underline{U} = U$. $\underline{U}_A = \frac{U}{2} e^{-j60^\circ}$; $\underline{U}_B = \frac{U}{2} e^{j180^\circ}$; $\underline{U}_C = \frac{U}{2} e^{j60^\circ}$	(3.125)
Напряжение на вторичных обмотках понижающего трансформатора	2	$\underline{U}'_a = \frac{U}{2n} e^{j120^\circ}$; $\underline{U}'_b = \frac{U}{2n}$; $\underline{U}'_c = \frac{U}{2n} e^{-j120^\circ}$	(3.124)
Однофазное напряжение на выходе трансформатора	3	$\underline{U} = U e^{j0^\circ}$	(3.126)
Напряжения симметрирующих элементов	4	$\underline{U}_1 = \frac{\sqrt{3}U}{2n} e^{j150^\circ}$;	(3.128)
		$\underline{U}_2 = \frac{\sqrt{3}U}{2n} e^{-j90^\circ}$	(3.130)
Сопротивления симметрирующих элементов	5	$x_1 = \frac{\sqrt{3}Z}{2 \cos \varphi}$	(3.71)
	6	$x_2 = \frac{\sqrt{3}Z}{\sin(\varphi - 30^\circ)}$	(3.73)

Продолжение таблицы 3.2

Название физической величины	№ п/п	Формула	Номер формулы в тексте
1	2	3	4
Токи трёхфазной симметричной нагрузки	7	$\underline{I}_a = \frac{U}{2nZ} e^{j(120^\circ - \varphi)}$	(3.88)
	8	$\underline{I}_b = \frac{U}{2nZ} e^{j\varphi}$	(3.90)
	9	$\underline{I}_c = \frac{U}{2nZ} e^{-j(120^\circ + \varphi)}$	(3.92)
Токи симметрирующих элементов	10	$\underline{I}_1 = \frac{U \cos \varphi}{nZ} e^{-j120^\circ}$	(3.94)
	11	$\underline{I}_2 = \frac{U \sin(\varphi - 30^\circ)}{2nZ}$	(3.96)
Токи вторичных обмоток трансформатора	12	$\underline{I}'_a = \frac{U}{4nZ} [2 \cos \varphi e^{-j120^\circ} - e^{-j\varphi}].$	(3.109)
	13	$\underline{I}'_b = \frac{U}{2nZ} [e^{-j\varphi} - 2 \cos \varphi e^{-j120^\circ}]$	(3.110)
	14	$\underline{I}'_c = \frac{U}{4nZ} [2 \cos \varphi e^{-j120^\circ} - e^{-j\varphi}].$	(3.109)
Токи первичных обмоток трансформатора	15	$\underline{I}_A = \underline{I}_C = \underline{I} = \frac{3U}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)]$	(3.118)
	16	$\underline{I}_B = -\underline{I} = -\frac{3U}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin(60^\circ - \varphi)]$	(3.119)
Мощность трёхфазной нагрузки	17	$\underline{S}_H = \frac{3U^2}{4n^2Z} [\cos \varphi + j \sin \varphi]$	(3.157)

Продолжение таблицы 3.2

Название физической величины	№ п/п	Формула	Номер формулы в тексте
1	2	3	4
Мощность ТПЧФ-2	18	$\underline{S} = \frac{3U^2}{4n^2Z} [\cos \varphi - j \sin(60^\circ - \varphi)]$	(3.160)
Мощность симметрирующих элементов	19	$Q_1 = \frac{\sqrt{3}U^2 \cos \varphi}{2n^2Z}$	(3.164)
	20	$Q_2 = \frac{\sqrt{3}U^2 \sin(\varphi - 30^\circ)}{4n^2Z}$	(3.165)
Ёмкости симметрирующих элементов	21	$C_1 = \frac{4nI_H \cos \varphi}{\omega \sqrt{3}U}$	(3.77)
	22	$C_2 = \frac{2nI_H \sin(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}U\omega}$	(3.81)

3.9 Выводы по третьей главе

1. Трансформаторный преобразователь числа фаз, преобразующий однофазный ток в трёхфазный (ТПЧФ-2), может быть изготовлен на базе типового понижающего трёхфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y_H , работающего в режиме однофазно-трёхфазного трансформатора с двумя конденсаторными батареями на его низкой стороне.
2. В результате анализа трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2 определены напряжения, токи и мощности однофазного источника питания, первичных и вторичных обмоток трансформатора, трёхфазной нагрузки и симметрирующих элементов.
3. С помощью векторной диаграммы напряжений и токов ТПЧФ-2 установлен принцип преобразования однофазного тока в трёхфазный.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

4.1 Электротехническое оборудование

Для проведения экспериментального исследования двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз и трёхпроводной системы электропередачи необходимо следующее электротехническое оборудование:

- силовые трёхфазные трансформаторы: один повышающий и один понижающий;
- конденсаторные батареи, в качестве фазопреобразующих элементов, четыре;
- магнитный усилитель – индуктивный фазопреобразующий элемент;
- воздушная линия электропередачи: двухпроводная и трёхпроводная;
- нагрузочное устройство, трёхфазное.

Для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии применялись четыре специальных измерительных комплекса Энергомонитор 3.3Т1.

Результаты экспериментального исследования также опубликованы в [26]. Личный вклад автора заключался в постановке задачи, непосредственном проведении экспериментальных исследований и обработке экспериментальных данных.

4.1.1 Силовые трёхфазные трансформаторы, повышающий типа ТС-1, понижающий типа ТС-2

Трансформатор типа ТС1-25-УХЛ3 предназначен для применения в цепях переменного тока частотой 50 или 60 Гц. По конструктивному исполнению трансформатор относится к силовым, сухим, электромагнитным трансформаторам с естественным охлаждением в защитном исполнении. Класс нагревостойкости изоляции F по ГОСТ 8865-87. Трансформатор состоит из магнитопровода стержневого типа и расположенных на нём катушек с первичной и вторичной обмотками (рисунок 4.1). Магнитопровод и катушки установлены в защитном кожухе. Подключе-

ние сетевых проводов и проводов нагрузки осуществляется через клеммы, расположенные на боковых стенках трансформатора.



Рисунок 4.1 – Сухой трансформатор ТС-1 (ТС-2). Защитный кожух частично снят для наглядности

Технические характеристики ТС-1 (ТС-2) приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики ТС-1 (ТС-2)

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВА	25
Номинальное значение напряжения обмоток ВН, В	500
Номинальное значение напряжения обмоток НН, В	400
Номинальный ток обмоток ВН, А	29
Номинальный ток обмоток НН, А	36
Число фаз	3
Материал обмоток	Al
Схема соединения обмоток	Y/Y
Длина, мм	630
Ширина, мм	435
Высота, мм	510
Расчётная масса, кг	160

Изготовитель: ООО «Электропромсервис», г. Санкт-Петербург, дата выпуска: 21.01.2013 г.

Опыт холостого хода ТС-1 (ТС-2)

На рисунке 4.2 изображена схема опыта холостого хода для ТС-1 (ТС-2).

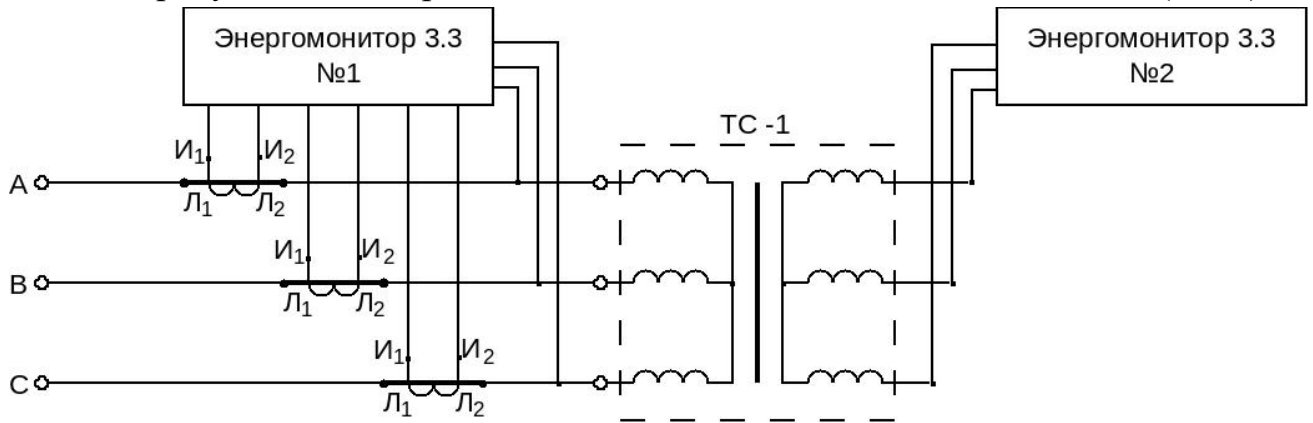


Рисунок 4.2 – Схема опыта холостого хода для ТС-1 (ТС-2)

Экспериментальные и расчётные данные опыта холостого хода приведены в таблицах 4.2 и 4.3.

I_A, I_B, I_C – токи в фазах А, В, С;

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения первичных обмоток ТС-1;

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – линейные напряжения вторичных обмоток ТС-1;

P_{W1}, P_{W2} , - показания энергомонитора при измерении мощности по методу двух приборов; $\sum P_W = P_{W1} + P_{W2}$.

Таблица 4.2 – Экспериментальные данные опыта холостого хода трансформатора ТС-1

I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	P_{W1}	P_{W2}	$\sum P_W$
А	А	А	В	В	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт
1,36	0,93	1,3	380,32	381,3	379,3	477,53	475,46	474,63	-187,31	424,79	237,4

$I_{Л1срх.х} = (I_A + I_B + I_C) / 3$ – среднее значение первичных токов;

$U_{Л1срх.х} = (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) / 3$ – среднее значение первичных напряжений;

n_1 – коэффициент трансформации;

Z_{xx}, R_{xx}, X_{xx} – полное, активное и реактивное сопротивление холостого хода ТС-1.

Таблица 4.3 – Расчетные данные опыта холостого хода трансформатора ТС-1

$I_{Л1срх.х}$	$U_{Л1срх.х}$	$U_{Л2срх.х}$	n_1	$Z_{x.x}$	$r_{x.x}$	$X_{x.x}$	$Z_{x.x}^*$	$R_{x.x}^*$	$X_{x.x}^*$	$\cos\phi_{x.x}$	$I_{x.x}$	$P_{x.x}$
А	А	А	В	В	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт	А
1,197	380,31	475,87	0,8	183,48	55,26	174,9	28,60	8,61	27,2	0,30	3,32	237,4

Расчётные данные опыта холостого хода ТС-1 определены по формулам (4.1) – (4.4) [8, 59]:

$$\left. \begin{aligned} Z_{x.x} &= \frac{U_{Л1срх.х}}{\sqrt{3}I_{Л1срх.х}}; \\ R_{x.x} &= \frac{P_{x.x}}{3I_{Л1срх.х}^2}; \\ x_{x.x} &= \sqrt{Z_{x.x}^2 - R_{x.x}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_{x.x} = \frac{P_{x.x}}{\sqrt{3}U_{Л1срх.х} \cdot I_{Л1срх.х}}. \quad (4.2)$$

Относительные значения перечисленных сопротивлений:

$$\left. \begin{aligned} Z_{x.x}^* &= \frac{Z_{x.x}I_H}{U_H}; \\ R_{x.x}^* &= \frac{R_{x.x}I_H}{U_H}; \\ x_{x.x}^* &= \frac{x_{x.x}I_H}{U_H}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

где I_H и U_H – фазные номинальные ток и напряжение.

Коэффициент трансформации:

$$n_1 = \frac{U_{Л1срх.х}}{U_{Л2срх.х}}. \quad (4.4)$$

Опыт короткого замыкания ТС-1

На рисунке 4.3 изображена схема опыта короткого замыкания для ТС-1 (ТС-2). Экспериментальные и расчетные данные опыта короткого замыкания приведены в таблицах 4.4 и 4.5.

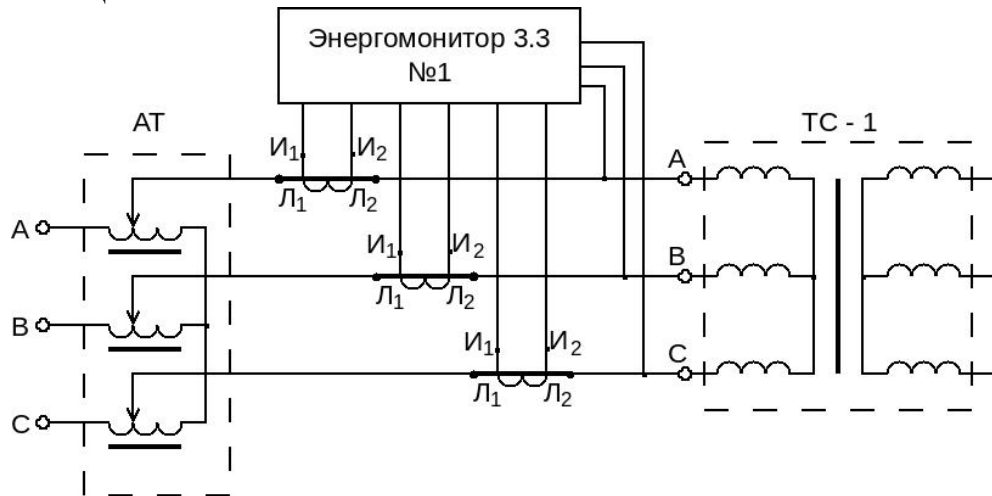


Рисунок 4.3 – Схема опыта короткого замыкания для ТС-1 (ТС-2)

Таблица 4.4 – Экспериментальные данные опыта короткого замыкания трансформатора ТС-1

I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_{W1}	P_{W2}	P
	А	А	В	В	В	Вт	Вт	Вт
37,46	36,45	36,62	16,47	16,37	16,53	305,66	599,15	904,81

Таблица 4.5 – Расчётные данные опыта короткого замыкания трансформатора ТС-1

Z_K	R_K	x_K	U_K	P_K	n_2	Z_{K115°	R_{K115°	$U_{K\%115^\circ}$	P_{K115°	$\cos \varphi_K$
Ом	Ом	Ом	%	Вт		Ом	Ом	%	Вт	
0,26	0,22	0,13	4,11	904,81	1,41	0,34	0,31	5,30	1276,5	0,86

Для трёхфазного трансформатора по показаниям приборов определяются средние значения линейного напряжения $U_{Л1срК}$, линейного тока $I_{Л1срК}$ и мощности короткого замыкания трех фаз P_K .

При соединении первичной обмотки в звезду параметры короткого замыкания на фазу будут следующие:

$$\left. \begin{aligned} Z_K &= \frac{U_{Л1срК}}{\sqrt{3}I_{Л1срК}}; \\ R_K &= \frac{P_K}{3I_{Л1срК}^2}; \\ x_K &= \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании определяется по формуле:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3}U_{Л1К} \cdot I_{Л1К}}. \quad (4.6)$$

Напряжение $U_K = U_{КН}$, при котором ток короткого замыкания равен номинальному: $I_K = I_H$, носит название напряжения короткого замыкания и обозначается u_K .

Величина u_K в относительных единицах равна сопротивлению короткого замыкания в относительных единицах.

$$u_{K^*} = \frac{U_{КН}}{U_H} = \frac{Z_K I_H}{U_H} = \frac{Z_K}{Z_H} = Z_{K^*}. \quad (4.7)$$

Величина u_K выражается на практике также в процентах:

$$u_{K\%} = \frac{U_{K.H}}{U_H} \cdot 100 = 100u_{K^*} = 100Z_{K^*}. \quad (4.8)$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$\left. \begin{aligned} u_{Ka} &= u_K \cos \varphi_K; \\ u_{KR} &= u_K \sin \varphi_K. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{Ka^*} &= R_{K^*}; \\ u_{KR^*} &= x_{K^*}. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Величины u_K , Z_K , R_K , P_K приводятся к температуре обмоток равной 115°C , для класса изоляции F:

$$u_{K115^\circ\%} = \frac{I_{1H\Phi} Z_{K115^\circ}}{U_{1H\Phi}} \cdot 100\%. \quad (4.11)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{K115^\circ} &= \sqrt{R_{K115^\circ}^2 + x_{K^*}^2}; \\ R_{K115^\circ} &= R_K \cdot K_t; \\ P_{K115^\circ} &= P_K \cdot K_t. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

где $K_t = \frac{225+115^\circ}{225+t^\circ}$, $t^\circ = 16^\circ\text{C}$ – температура в помещении.

Напряжение короткого замыкания характеризует величину активных сопротивлений и индуктивных сопротивлений рассеяния трансформатора, и является важной характеристикой трансформатора. Величина напряжения короткого замыкания указывается в паспорте трансформатора. Мощность короткого замыкания P_K с большой точностью представляет собой мощность электрических потерь в обмотках, включая добавочные потери в стенках бака и в крепёжных деталях от потоков рассеяния трансформатора.

Если короткое замыкание происходит при номинальном первичном напряжении, то:

$$I_K = \frac{U_H}{Z_K}. \quad (4.13)$$

или в относительных единицах:

$$I_{K^*} = \frac{I}{Z_{K^*}} = \frac{100}{U_{K\%}}. \quad (4.14)$$

Технические характеристики понижающего трёхфазного трансформатора ТС-2.

Трансформатор ТС-2 по конструкции идентичен трансформатору ТС-1. В экспериментальных исследованиях используется в качестве понижающего трансформатор на 500/400 В.

Результаты экспериментального исследования и расчёта ТС-2 при холостом ходе представлены в таблице 4.6 и таблице 4.7.

Таблица 4.6 – Экспериментальные данные опыта холостого хода трансформатора ТС-2

I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	P_{W1}	P_{W2}	$\sum P_W$
А	А	А	В	В	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт
1,36	0,93	1,32	382,13	379,98	381,16	475,71	478,07	477,07	-182,88	419,09	236,21

Таблица 4.7 – Расчётные данные опыта холостого хода трансформатора ТС-2

$I_{Л1грх.х}$	$U_{Л1грх.х}$	$U_{Л2грх.х}$	κ_L	$Z_{x.x}$	$R_{x.x}$	$x_{x.x}$	$Z_{x.x}^*$	$R_{x.x}^*$	$x_{x.x}^*$	$\cos\varphi_{x.x}$	$I_{x.x}$	$P_{x.x}$
А	В	В		Ом	Ом	Ом	о.е	о.е	о.е		%	Вт
1,203	381,09	476,95	0,80	182,84	54,38	174,57	28,5	8,48	27,21	0,30	3,34	236,21

Результаты экспериментального исследования и расчёта ТС-2 при коротком замыкании представлены в таблице 4.8 и таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Экспериментальные данные опыта короткого замыкания трансформатора ТС-2

I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_{W1}	P_{W2}	P
А	А	А	В	В	В	Вт	Вт	Вт
35,52	35,63	35,96	16,26	16,36	16,54	287,38	588,17	857,56

Таблица 4.9 – Расчётные данные опыта короткого замыкания трансформатора ТС-2

Z_K	R_K	x_K	U_K	P_K	K_t	Z_{K75°	R_{K75°	$U_{K\%75^\circ}$	P_{K75°	$\cos\varphi_K$
Ом	Ом	Ом	%	Вт		Ом	Ом	%	Вт	
0,26	0,22	0,14	4,1	857,56	1,41	0,35	0,32	5,40	1209,84	0,85

4.1.2 Конденсаторные батареи

Четыре конденсаторные батареи набраны из отдельных косинусных конденсаторов типа ЕА (Изготовитель RTR Rnergia – Испания) номинальной мощностью 3, 4, 5, 10, 12,5 и 15 квар. Основные технические данные конденсатора 3 квар приведены в таблице 4.10.

Назначение конденсаторов типа ЕА: Конденсатор плёночный однофазный предназначен для систем компенсации реактивной мощности (КРМ), в том числе для местной компенсации (подключение конденсаторов параллельно двигателям и т.п.).

Технические данные конденсаторных батарей приведены в таблице 4.11. Изображение конденсаторных батарей приведено на рисунке 4.4.

Таблица 4.10 – Основные технические данные конденсатора 3 квар

Параметр	Значение
Номинальная мощность, квар	3
Номинальное значение напряжения, В	600
Номинальная частота, Гц	50
Продолжение таблицы 4.10	
Параметр	Значение
Число фаз	1
Номинальная ёмкость, мкФ	26,52
Ток, А	2,9
Габариты (диаметр x длина), мм	70x215
Вес, кг	0,8
Срок службы до списания	не менее 10 лет
Диэлектрик	Металлизированная пропиленовая плёнка
Предполагаемый срок службы	120000 тысяч часов
Защита	IP20
Тип соединения	Схема соединения треугольником
Корпус	Алюминиевый

Таблица 4.11 – Технические данные конденсаторных батарей

Номера конденсаторных батарей					
1(2, 3)			4		
Число конденс. в батарее	Номинальная мощность	Номинальная ёмкость	Число конденс. в батарее	Номинальная мощность	Номинальная ёмкость
шт.	квар	мкФ	шт.	квар	мкФ
1	15	132,62	1	15	132,62
1	12,5	110,52	1	10	88,41
1	10	88,41	1	10	88,41
1	4	35,36	1	5	44,21
1	3	26,52	1	3	26,52
Всего 5	44,5	393,43	5	43	380,17



Рисунок 4.4 – Конденсаторные батареи

4.1.3 Магнитный усилитель

При малых значениях угла $\varphi = 0 - 30^\circ$ нагрузки фазообразующим элементом трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ) в некоторых случаях должен быть индуктивный элемент. В качестве такого элемента используется магнитный усилитель (МУ). Электрическая схема МУ приведена на рисунке 4.5.

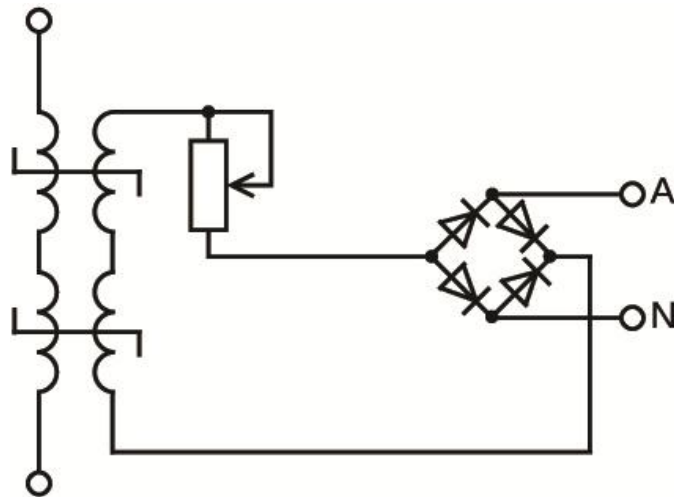


Рисунок 4.5 – Электрическая схема магнитного усилителя

Общий вид магнитного усилителя, изготовленного на кафедре Электроэнергетики и электрооборудования, представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Общий вид магнитного усилителя

Магнитный усилитель изготовлен на базе двух однофазных понижающих трансформаторов типа ОС-2/0,5 мощностью 2 кВА каждый (рисунки 4.7 и 4.8).



Рисунок 4.7 – Данные трансформатора ОС-2/0,5 №2535



Рисунок 4.8 – Данные трансформатора ОС-2/0,5 №2541

4.1.4 Двухпроводная линия электропередачи

В научно-исследовательской работе применена двухпроводная система электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз. Для осуществления такой системы электропередачи применяется двухпроводная линия. Воздушная двухпроводная линия выполнена проводом марки СИП-4 сечением 25 мм^2 , длиной 370 м.

Для определения параметров этой линии проведено её экспериментальное исследование по схеме, рисунок 4.9. Результаты этого исследования приведены в таблицах 4.12 и 4.13.

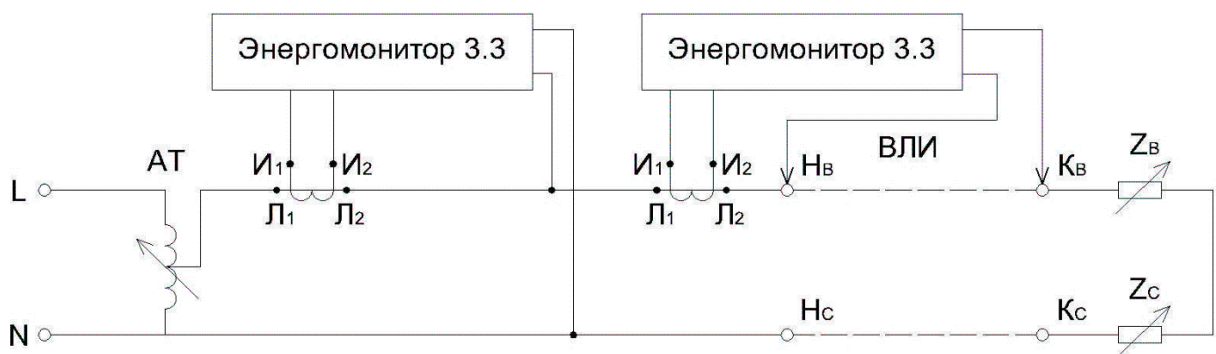


Рисунок 4.9 – Схема установки для определения параметров двухпроводной линии

Таблица 4.12 – Результаты экспериментального исследования двухпроводной линии длиной 370 м

Измер. величина.	Ед. изм.	Номер опыта		
		1	2	3
I_B	А	5,1	10,2	15,1
I_C	А	5,1	10,2	15,1
ΔU_B	В	2,3	4,6	6,8
ΔU_C	В	2,3	4,69	6,9
ΔP_B	Вт	11,8	46,9	103,5
ΔP_C	Вт	12	47,8	105,8
ΔQ_B	вар	0,9	3,9	8,8
ΔQ_C	вар	0,9	3,9	8,8

Таблица 4.13 – Расчётные данные параметров двухпроводной линии длиной 370 м

	Параметр	Ед. изм.	Номер опыта			Среднее значение
			1	2	3	
Фаза В	Z_L	Ом	0,455	0,451	0,450	0,452
	R_L	Ом	0,454	0,451	0,454	0,453
	x_L	Ом	0,035	0,037	0,039	0,037
Фаза С	Z_L	Ом	0,463	0,461	0,466	0,463
	R_L	Ом	0,461	0,459	0,464	0,462
	x_L	Ом	0,035	0,037	0,039	0,037

4.1.5 Нагрузочное устройство

Трёхфазное симметричное нагрузочное устройство изготовлено из отдельных активных элементов на кафедре Электроэнергетики и электрооборудования СПбГАУ общей мощностью 25 кВт. Общий вид этого устройства представлен на рисунке 4.10, а его электрическая схема на рисунке 4.11.

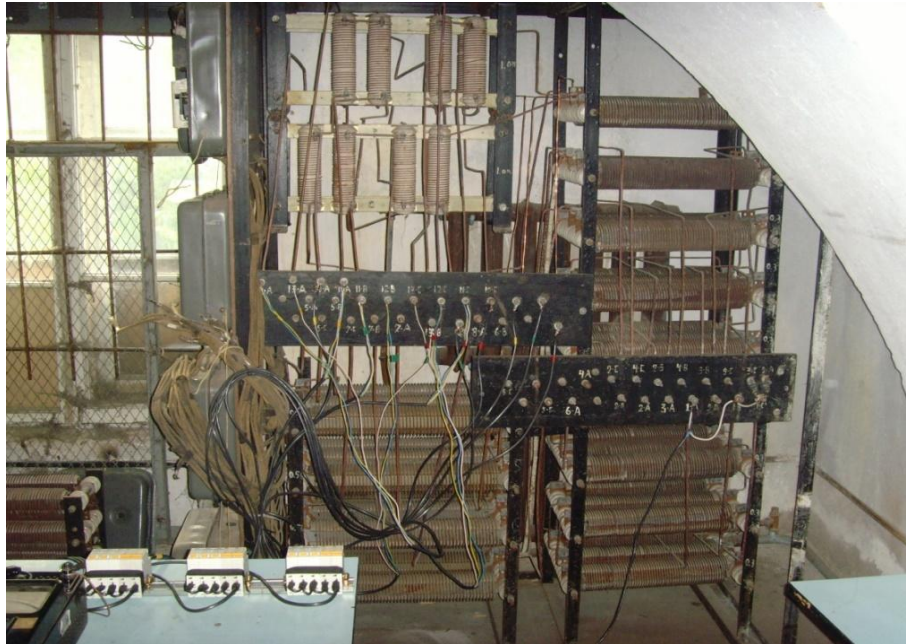


Рисунок 4.10 – Трёхфазное симметричное нагрузочное устройство

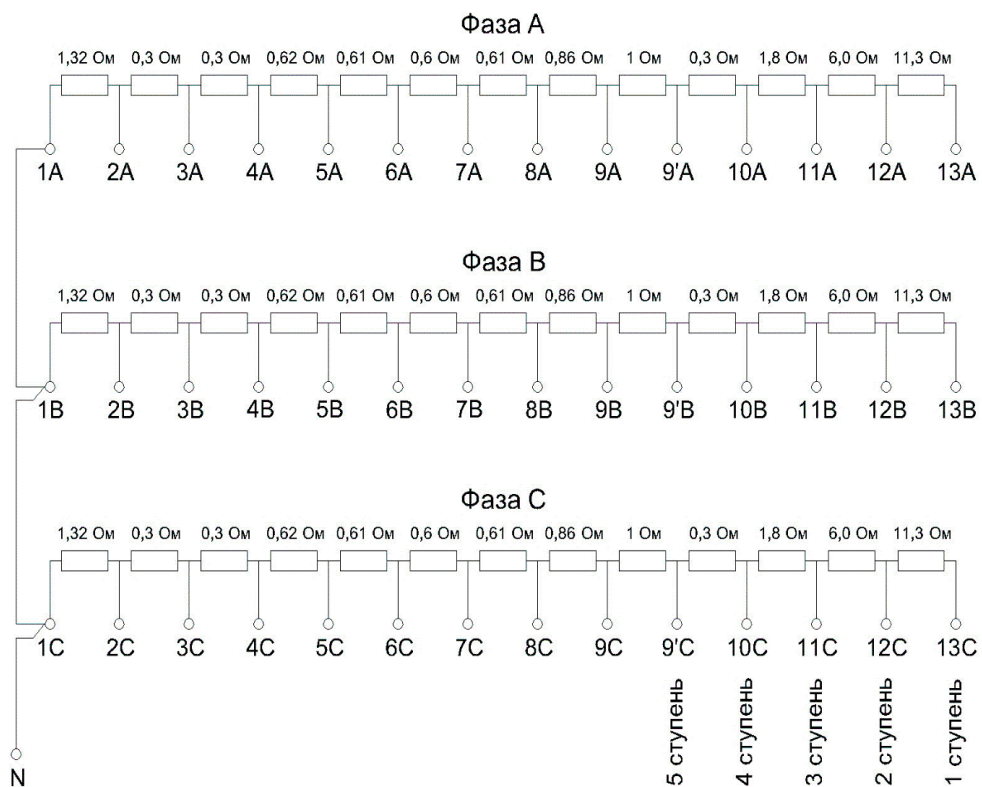


Рисунок 4.11– Схема трёхфазного симметричного нагрузочного устройства

4.1.6 Энергомонитор

При экспериментальном исследовании систем электропередачи приходится измерять различные физические величины: напряжение, ток, активную, реактивную и полную мощность, симметричные составляющие трёхфазных напряжений и токов и другие. Для этой цели мы применяли измерительные комплексы

Энергомонитор 3.3Т1 с заводскими номерами №1819 и №1820 производства 2012 года, и №120 производства 2014 года. Все измерительные комплексы Энергомонитор 3.3Т1 используемые при проведении экспериментальных исследований имели актуальные свидетельства о поверке на момент проведения экспериментальных исследований.

Энергомонитор 3.3Т1 – прибор для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии высокой точности (класс точности 0,1). Технические характеристики Энергомонитора 3.3Т1 представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Технические характеристики Энергомонитора 3.3Т1 [51]

Измеряемые ПКЭ и параметры электрической энергии	Диапазоны измерений	Пределы и вид допускаемой основной погрешности измерений	Интервал усреднения результатов измерения, с	Примечание
1 Установившиеся отклонение напряжения (δU_u , %)	-100...+40	+0,2% абсолютная	60	
2 Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (K_u , %)	0...49,9	$\pm 0,05\%$ абсолютная $\pm 5\%$ относительная	3	$K_u < 1.0$ $K_u \geq 1.0$
3 Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40 ($K_{u(n)}$, %)	0...49,9	$\pm 0,05\%$ абсолютная $\pm 5\%$ относительная	3	$K_{u(n)} < 1.0$ $K_{u(n)} \geq 1.0$
4 Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2u} , %)	0...50	$\pm 0,2\%$ абсолютная	3	
5 Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (K_{0u} , %)	0...50	$\pm 0,2\%$ абсолютная	3	
6 Отклонение частоты, Δf , Гц	-5...+25	$\pm 0,01$ Гц абсолютная	20	
7 Коэффициент искажения синусоидальности тока (K_I , %)	0...49,9	$\pm 0,1\%$ абсолютная $\pm 10\%$ относительная $\pm 0,2\%*$ абсолютная $\pm 20%*$ относительная	3	$K_I < 1.0$ $K_I \geq 1.0$ $K_I < 1.0$ $K_I \geq 1.0$
8 Коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40 ($K_{I(n)}$, %)	0...49,9	$\pm 0,1\%$ абсолютная $\pm 10\%$ относительная $\pm 0,2%*$ абсолютная $\pm 20%*$ относительная	3	$K_{I(n)} < 1.0$ $K_{I(n)} \geq 1.0$ $K_{I(n)} < 1.0$ $K_{I(n)} \geq 1.0$
9 Ток нулевой последовательности (I_0 , А)	0... I_H	$\pm 0,002 I_H$ А абсолютная $\pm 0,02 I_H$ А* абсолютная	3	
10 Ток обратной последовательности (I_2 , А)	0... I_H	$\pm 0,002 I_H$ А абсолютная $\pm 0,02 I_H$ А* абсолютная	3	
11 Действующее (среднеквадратическое) значение переменного напряжения (U, В)	40... 400	относительная $\pm 0,1\%$	0,32	Номинальные напряжения поддиапазонов: $U_H = 100$ В $U_H = 250$ В $U_H = 400$ В

Продолжение таблицы таблицы 4.14

Измеряемые ПКЭ и параметры электрической энергии	Диапазоны измерений	Пределы и вид допускаемой основной погрешности измерений	Интервал усреднения результатов измерения, с	Примечание
12 Действующее (среднеквадратическое) значение переменного тока (I, А)	0,005 I _н ... 1,5I _н 0,05 I _н ... 1,5I _н *	относительная ±[0,1+0,01((I _н /I)-1)]% ±[1+0,05((I _н /I)-1)]%*	0,32	Номинальные токи: I _н = 1А, 10А, 50А I _н *= 10А, 100А, 300А, 1000А, 3000А
13 Фазовый угол между фазными напряжениями первой гармоники (φ _и , град.)	0...360	±0,2° абсолютная	0,32	
14 Фазовый угол между фазными токами первой гармоники (φ _и , град.)	0...360	±0,2° абсолютная ±0,5°* абсолютная	0,32	0,2 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н 0,2 I _н * ≤ I ≤ 1,5 I _н *
15 Фазовый угол между напряжением и током первой гармоники одной фазы (φ _{и1} , град.)	0...360	±0,2° абсолютная ±0,5°* абсолютная	0,32	0,2 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н 0,2 I _н * ≤ I ≤ 1,5 I _н *
16 Активная электрическая мощность (Р, Вт) Активная электрическая энергия (W _i , Вт с) рассчитывается за интервал времени от 1с до 30мин., отображается на ПК	От 0.01I _н U _н до 1.5I _н 1.2U _н	относительная ±0,1% ±1,0%* ±0,2% ±0,4%** ±0,15% ±0,3%** ±0,25% ±0,5%** ±2,0%*	0,32	cosφ=1 0,1 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н 0,01 I _н ≤ I ≤ 0,1 I _н cosφ 0,5L; 0,5C 0,1 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н 0,02 I _н ≤ I ≤ 0,1 I _н cosφ 0,5 L; 0,8C 0,2 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н
17 Реактивная электрическая мощность (Q, вар) рассчитывается тремя методами: Q ₁ =√(S ² -P ²) Q ₂ =UIsinφ ₁ Q ₃ =UIcos(φ+90°) - метод перекрестного включения Реактивная электрическая энергия (W _o , вар с) рассчитывается за интервал времени от 1с до 30мин., отображается на ПК	От 0.01I _н U _н до 1.5I _н 1.2U _н	относительная ±0,3 % ±2,0%* ±0,5 % ±4,0%*	0,32	sinφ=1 0,1 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н sinφ 0,5 L; 0,5C 0,1 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н 0,2 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н
18 Полная электрическая мощность (S, ВА) Полная электрическая энергия (W _s , ВА с) рассчитывается за интервал времени от 1с до 30мин., отображается на ПК	От 0.01I _н U _н до 1.5I _н 1.2U _н	относительная ±[0,2+0,01((S _н /S)-1)]% ±[1,0+0,05((S _н /S)-1)]%*	0,32	0,1 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н
19 Коэффициент мощности (K _p)	-1,0...+1,0	абсолютная 0,02 0,05*	0,32	0,1 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н 0,2 I _н ≤ I ≤ 1,5 I _н
20 Частота переменного тока (f, Гц)	45... 75	±0,01 Гц абсолютная	0,32	0,1 I _н < I < 1,5 I _н
21 Текущее время	—	+2 с/сут абсолютная	—	В диапазоне температур от 10 до 35 °С

На рисунках 4.12 и 4.13 изображены схемы подключения прибора к трёхфазной трёхпроводной и однофазной двухпроводной сети с помощью токоизмерительных клещей.

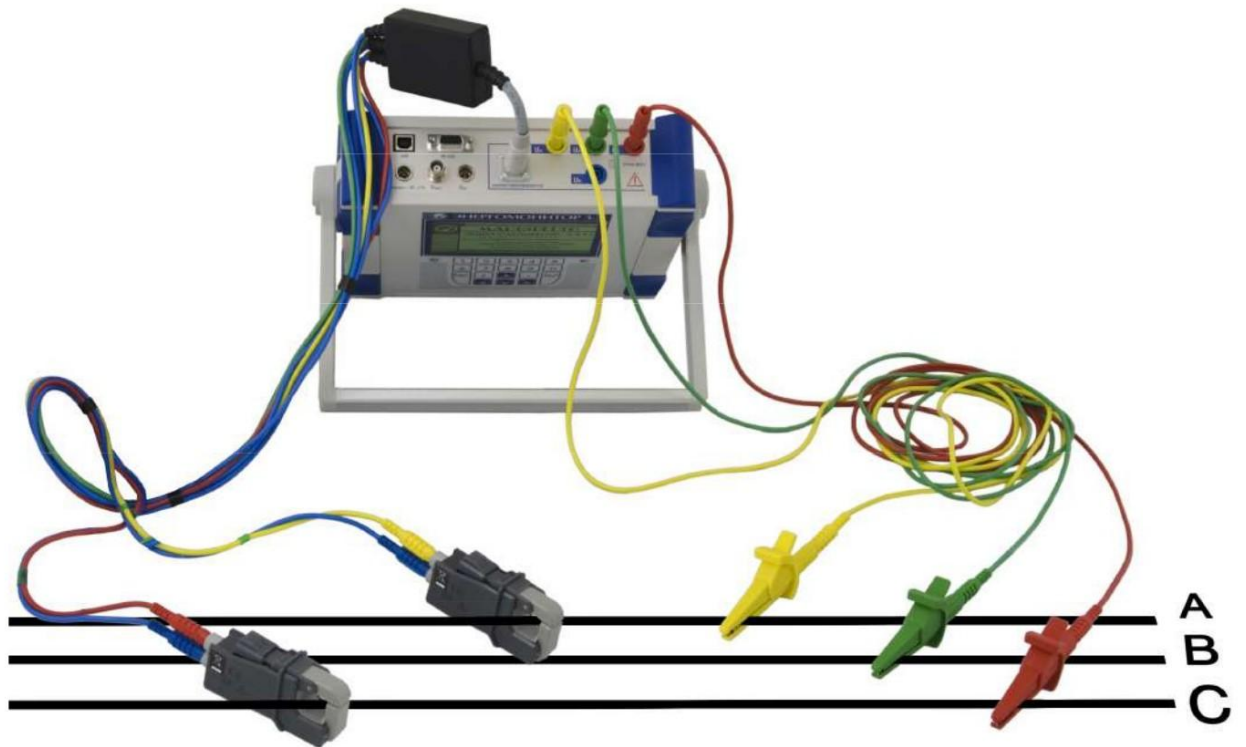


Рисунок 4.12 – Схема подключения прибора к трёхфазной трёхпроводной сети с помощью токоизмерительных клещей [51].

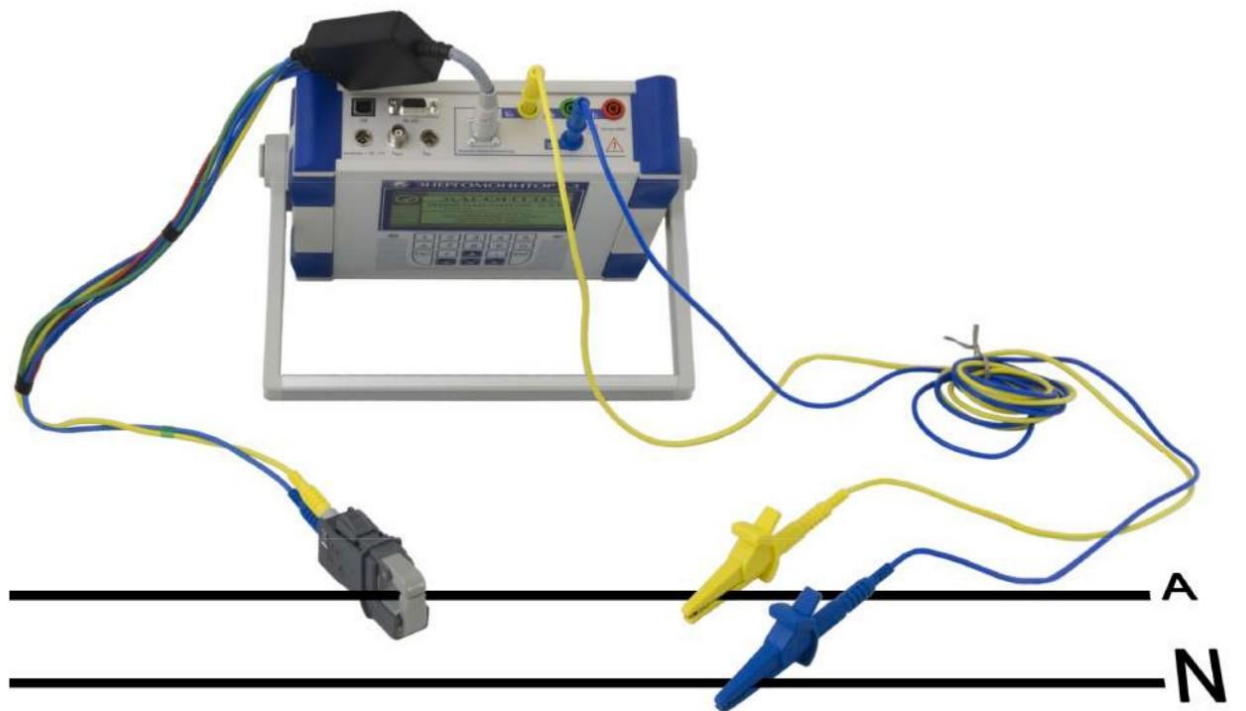


Рисунок 4.13 – Схема подключения прибора к однофазной двухпроводной сети с помощью токоизмерительных клещей [51].

4.2 Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз

При экспериментальном исследовании двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с ТПЧФ используются трансформаторные преобразователи числа фаз с включением фазопреобразующих элементов на низкой стороне трансформаторов: у ТПЧФ-1 - на входе трансформатора (на зажимах первичной обмотки), у ТПЧФ-2 - на выходе трансформатора (на зажимах вторичной обмотки). Какими преимуществами обладает данная схема включения конденсаторов?

Дело в том, что конденсаторы изготавливаются на напряжение не более 10 кВ. Линии электропередачи применяются на напряжение 35, 110 и более киловольт. Поэтому, для ТПЧФ придётся выполнять специальные конденсаторы на высокое напряжение, а это дорого! И все преимущества двухпроводной системы исчезают. Следовательно, чтобы сохранить достоинства двухпроводной системы перед трёхпроводными системами, надо применять схемы ТПЧФ с низковольтными конденсаторами, которые широко применяются для компенсации реактивной мощности.

Разработанные нами трансформаторные преобразователи числа фаз с фазопреобразующими элементами на низкой стороне трансформаторов предусматривают применение низковольтных конденсаторов.

На электрической схеме установки (рисунок 4.14) изображена схема ТПЧФ-1 с конденсаторными фазопреобразующими элементами C_1 и C_2 на низкой стороне повышающего трансформатора. Для измерения напряжений, токов, активной, реактивной и полной мощности, а также значений ёмкостей C_1 и C_2 предназначены измерительные устройства «Энергомонитор 3.3Т1» №1 и №2.

К выходным зажимам ТПЧФ-1 подключена двухпроводная линия, длиной 370 м выполненная проводом марки СИП-4 сечением 25 мм². Концы линии через «Энергомонитор 3.3Т1» №3 подключены к зажимам первичной обмотки понижающего трансформатора ТПЧФ-2 с фазопреобразующими элементами - ёмкостью C_3 и индуктивностью L_4 . К выходным зажимам трансформатора ТПЧФ-2 подключён

«Энергомонитор 3.3Т1» №4, и далее подключено трёхфазное нагрузочное устройство.

Трёхфазные асинхронные электродвигатели, имеющиеся в научно-исследовательской лаборатории при экспериментальном исследовании двухпроводной системы электропередачи, не применялись по следующей причине. Параметры фазопреобразующих элементов (конденсаторов и катушек индуктивности) ТПЧФ зависят от величины нагрузки и $\cos\varphi$, которые изменяются при работе электродвигателя. Следовательно, их нельзя предварительно установить в ТПЧФ и обеспечить работу трансформаторного преобразователя. Поэтому в качестве нагрузки ТПЧФ мы применяли статическое устройство, изготовленное из отдельных активных элементов с известными значениями сопротивлений.

На рисунке 4.15 изображён общий вид установки для исследования двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз.

Результаты измерений при экспериментальном исследовании двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с ТПЧФ приведены в таблице 4.15.

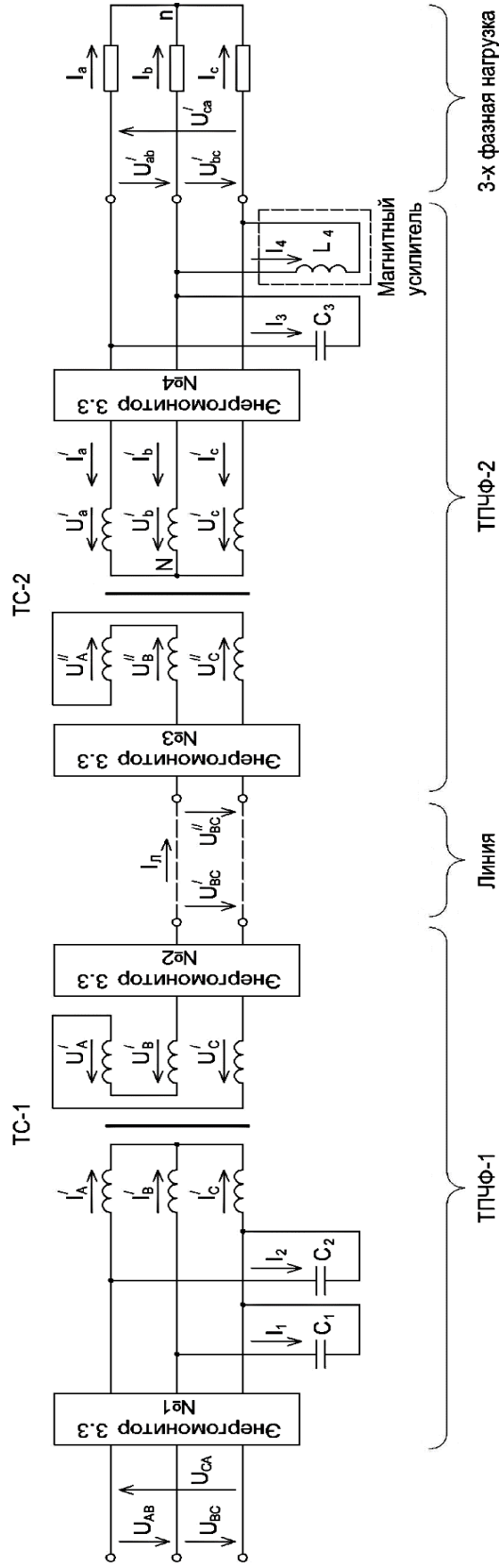


Рисунок 4.14 – Схема экспериментальной установки для исследования двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз



Рисунок 4.15 – Общий вид экспериментальной установки для исследования двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз

Таблица 4.15 – Результаты исследования экспериментальной двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз

	Измеряемая величина	Ед. изм.	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Вход ТПЧФ-1 Энергомонитор 3.3 №1	U_{AB}	В	150,6	150,3	150,6	150,4	150,3
	U_{BC}	В	150,4	150,1	150,7	150,3	150,4
	U_{CA}	В	150,2	150,8	150,2	150,5	150,1
	I_A	А	5,7	10,5	18,79	22,4	25,59
	I_B	А	5,67	9,55	15,18	18	19,5
	I_C	А	5,97	10,5	18,5	22,5	25,3
	I'_A	А	2,8	4,95	8	9,63	10,87
	I'_B	А	6	10,4	16,65	19,7	21,7
	I'_C	А	3	5,2	8,25	9,87	11,1
	I_1	А	5,9	10,3	18	21,9	24
	I_2	А	2,9	5,62	10,7	12,5	14,7
	P	Вт	773,5	1326	2165	2607	2896
	Q	вар	-1310	-2386	-4350	-5256	-5973
	S	ВА	1521	2732	4860	5870	6640
	C_1 уст.	мкФ	123,9	221,4	380,9	469,4	524,8
	C_1 расчёт	мкФ	124,51	222,67	377,66	463,68	525,37
C_2 уст.	мкФ	62	115,1	221,4	261,2	305,6	
C_2 расчёт	мкФ	65,64	117,06	213,77	264,15	311,31	
Выход ТПЧФ-1 Энергомонитор 3.3 №2	U'_A	В	111,8	114	116,7	118,2	118,1
	U'_B	В	109,8	110,5	114	114,8	116
	U'_C	В	103,2	98,6	92	88,2	85,7
	$U'_{BC} (U_{лн})$	В	213,2	207,5	201,1	196,1	193,2
	$I_{л}$	А	3,46	6	9,89	12	13,3
	φ	град	1,7	2,3	4,35	4,8	6
	P	Вт	734,4	1246,5	1984,8	2335,9	2560
	Q	вар	79,3	102	154,8	199,3	274,8
	S	ВА	737,4	1256	1990,8	2344	2575
Вход ТПЧФ-2 Энергомонитор 3.3 №3	U''_A	В	93,7	90,8	85,4	80,7	78,5
	U''_B	В	102,1	95,3	86,4	81,5	78,2
	U''_C	В	88,3	94	95,8	96,6	95,6
	U''_{BC}	В	209,6	201,5	191,5	184,2	180,2
	φ	град	0,99	1,5	3,46	4,1	5,4
	P	Вт	720,6	1204,9	1877	2193	2383,5
	Q	вар	77,49	92,6	123	160	228
	S	ВА	724,7	1209	1881	2200	2395,8

Продолжение таблицы 4.15

	Измеряемая величина	Ед. изм.	Номер опыта				
			1	2	3	5	5
Выход ТПЦФ-2 Энергомонитор 3.3 №3	U'_a	В	74,7	72,2	67,3	63,4	61,3
	U'_b	В	80,6	74,4	66,5	62,3	59,3
	U'_c	В	69,8	74	74,6	74,5	73,7
	I'_a	А	3,14	5,4	8,7	10,2	11,3
	I'_b	А	5,87	10,3	16,8	19,8	22,1
	I'_c	А	2,8	5	8,27	9,91	11,1
	I_3	А	2,7	5,1	8,85	11,1	12,4
	I_4	А	2,66	4,64	7,48	8,82	10
	φ му	град	84,5	85,1	85,1	85	84,9
	P му	Вт	30,3	45,3	68	82,1	88,3
	Q му	вар	336,1	567,1	830,6	945	1002,5
	S му	ВА	337,6	568,1	832,3	949,6	1006,2
	C_3 уст.	мкФ	62	115,1	212,4	283,2	323,1
	C_3 расчёт	мкФ	67,27	119,7	216,15	276,91	320,59
	Z магн. усилит. установл.	Ом	47,74	26,15	14,68	11,89	9,83
	Z магн. усилит. расчёт	Ом	47,35	26,6	14,73	11,5	9,93
Нагрузка Энергомонитор 3.3 №4	U'_{ab}	В	144,1	137,6	128,6	121,9	117,8
	U'_{bc}	В	126,8	122,5	110,9	105,1	99,85
	U'_{ca}	В	116,1	120	115,7	112	108,8
	I_a	А	2,9	5,1	8,56	10,3	11,5
	I_b	А	3,1	5,1	8,19	9,6	10,5
	I_c	А	2,48	4,45	7,25	8,7	9,65
	P	Вт	640,6	1077	1630	1855	1979
	Q	вар	31,1	123,6	266	360,6	399,5
	S	ВА	641,4	1083	1650	1888	2017
	ступень нагрузки		1	2	3	4	5

4.3 Результаты экспериментального исследования двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз

Определим потери мощности в электрооборудовании двухпроводной системы электропередачи по результатам измерения активных мощностей (таблица 4.15).

Потери мощности в ТПЧФ и трансформаторе ТС-1:

$$\Delta P_1 = P_{\text{вх1}} - P_{\text{вых1}}. \quad (4.15)$$

Потери мощности в ТПЧФ и трансформаторе ТС-2:

$$\Delta P_2 = P_{\text{вх2}} - P_{\text{вых2}}. \quad (4.16)$$

Потери мощности в двухпроводной линии:

$$\Delta P_{\text{л}} = P_{\text{вых1}} - P_{\text{вх2}}. \quad (4.17)$$

Расчётное значение мощности трёхфазной нагрузки приведено в таблице 4.16.

Суммарные потери в системе электропередачи:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_{\text{л}}. \quad (4.18)$$

Мощность трёхфазной активной нагрузки измерена четвёртым «Энергомонитором 3.3Т1» ($P_{\text{вых3}}$). Эту же мощность можно вычислить как разность мощности на входе установки $P_{\text{вх1}}$ и суммарных потерь $\Sigma \Delta P$. Таким образом проверяется правильность измерения мощностей всеми «Энергомониторами 3.3Т1». Сравнивая результаты измерения и расчёта этой мощности, мы видим, что в обоих случаях они полностью совпадают

Таблица 4.16 – Расчёт энергетических показателей в электрооборудовании двухпроводной системы ТПЧФ

Место установки Энергомонитора	Изм. вел.	Ед. изм.	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Вход ТПЧФ-1	$P_{\text{вх1}}$	Вт	773,5	1326	2165	2607	2896
Выход ТПЧФ-1	$P_{\text{вых1}}$	Вт	734,4	1246,5	1984,8	2335,9	2560
Вход ТПЧФ-2	$P_{\text{вх2}}$	Вт	720,6	1204,9	1877	2193	2383,5
Выход ТПЧФ-2	$P_{\text{вых2}}$	Вт	640,6	1077	1630	1855	1979
Потери ТПЧФ-1	ΔP_1	Вт	39,1	86,1	180,2	271,1	336

Продолжение таблицы 4.16

Место установки Энергомонитора	Изм. вел.	Ед. изм.	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Потери ТПЧФ-2	ΔP_2	Вт	80	127,9	247	338	404,5
Потери в линии	ΔP_L	Вт	13,8	41,6	107,8	142,9	176,5
Суммарные потери	$\Sigma \Delta P$	Вт	132,9	255,6	535	752	917
Мощность трёхфазной нагрузки	$P_{\text{вых3}}$	Вт	640,6	1070,4	1630	1855	1979
КПД системы	$\eta = \frac{P_{\text{вых3}}}{P_{\text{вх1}}}$	%	82,8	81,2	75,3	71,2	68,3
Напряжение в начале линии	U'_{BC}	В	213,2	207,5	201,1	196,1	193,2
Напряжение в конце линии	U''_{BC}	В	209,6	201,5	191,5	184,2	180,2
Потери напряжения в двухпроводной проводной линии	ΔU_L	В	3,6	6	9,6	11,9	13
		%	1,69	2,89	4,77	6,07	6,7
Передаваемая по линии полная мощность	$S_{\text{вых1}}$	ВА	737	1256	1991	2344	2575
ТПЧФ-1							
C_1 расчёт	C_{1P}	мкФ	124,51	222,67	377,66	463,68	525,37
C_1 опыт	C_{1O}	мкФ	123,9	221,4	380,9	469,4	524,8
Расхождение	$\frac{(C_{1P} - C_{1O})}{C_{1P}} \cdot 100$	%	0,49	0,57	-0,86	-1,23	0,11
C_2 расчёт	C_{2P}	мкФ	65,64	117,06	213,77	264,15	311,31
C_2 опыт	C_{2O}	мкФ	62	115,1	221,4	2261,2	305,6
Расхождение		%	5,55	1,67	-3,57	1,12	1,83
ТПЧФ-2							
C_3 расчёт	C_{3P}	мкФ	67,27	119,7	216,15	276,91	320,59
C_3 опыт	C_{3O}	мкФ	62	115,1	212,4	283,2	323,1
Расхождение		%	7,83	3,84	1,73	-2,27	-0,78
Z_4 расчёт	Z_{4P}	Ом	47,35	26,6	14,73	11,5	9,93
Z_4 опыт	Z_{4O}	Ом	47,74	26,15	14,68	11,89	9,83
Расхождение		%	-0,82	1,69	0,34	-3,39	1,01

В таблице 4.16 и на рисунке Г.1 в приложении Г приведены расчётные и опытные значения параметров фазопреобразующих элементов ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 и их расхождения. Сравнение опытных данных с расчётными показывает, что их максимальное расхождение составляет 8%. Следовательно, формулы расчёта параметров фазопреобразующих элементов ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 правильные.

В таблице 4.16 приведены значения напряжений в начале и конце двухпроводной линии и потери напряжения в этой линии

4.4 Выводы по четвертой главе

1. Теоретические разработки подтверждены экспериментальными исследованиями о возможности создания трансформаторных преобразователей числа фаз с фазопреобразующими элементами на низкой стороне трансформаторов. В этом случае при изготовлении ТПЧФ можно применять в качестве фазопреобразующих элементов низковольтные конденсаторы (до 600 В) с автоматическим регулированием ёмкости, широко применяемые в электрических сетях для компенсации реактивной мощности.
2. Суммарные потери мощности в двухпроводной системе электропередачи больше потерь в трёхфазном силовом трансформаторе. Поэтому коэффициент полезного действия двухпроводной системы электропередачи в 1,08 – 1,28 раза ниже КПД трёхфазного силового трансформатора.
3. Для повышения КПД двухпроводной системы электропередачи до значения КПД трёхфазного силового трансформатора необходимо изменить конструкцию высоковольтных обмоток ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 – увеличить поперечное сечение провода обмоток или заменить материал провода обмоток (алюминий на медь).

ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОБЪЕКТОВ АПК

5.1 Технические характеристики удалённого от источников электроэнергии объекта АПК

Объект АПК удалён от источника питания на расстояние 10 км, активная мощность которого равна $P_{\text{ном}} = 80$ кВт, $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,8$, $U_{\text{ном}} = 380$ В.

Определим номинальную полную мощность объекта электроснабжения:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{80}{0,8} = 100 \text{ кВА.} \quad (5.1)$$

Источником питания для объекта АПК является установка ВИЭ (мини ГЭС) напряжение на выходе генератора 400В.

Пример расчёта технико-экономического обоснования был рассмотрен в статье [59]. Личный вклад автора заключался в постановке задачи и задании исходных данных. На основе статьи [59] автором были составлены подробные сметы стоимости строительства, приведённые в приложении Д.

5.2. Трёхпроводная схема электроснабжения

Электроснабжение объекта АПК осуществляется от трансформаторной подстанции ТП-1, на которой установлен повышающий трёхфазный трансформатор типа ТМГ мощностью 100 кВА, 0,4/10 кВ, схема соединения обмоток $Y/Y_{\text{н}}$ [56]. Электроэнергия передаётся к объекту по трёхфазной трёхпроводной ВЛ 10 кВ до трансформаторной подстанции ТП-2, на которой установлен понижающий трёхфазный трансформатор типа ТМГ мощностью 100 кВА, 10/0,4 кВ.

Исходя из номинальной мощности объекта электроснабжения $S_{\text{ном}}=100$ кВА выбираем трансформатор типа ТМГ-100/10-У1(ХЛ1), 10/0,4 кВ [56]. Трёхфазную трёхпроводную ВЛ 10 кВ выполняем с защищёнными проводами марки СИП-3.

Определяем ток в ВЛ 10/0,4 кВ, равный току нагрузки:

$$I_{\text{ВЛ } 10} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ВН}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,77 \text{ А,} \quad (5.2)$$

где $U_{ВН}$ – линейное напряжение ВЛ среднего напряжения, киловольты.

Минимальное сечение провода СИП-3 допустимое для ВЛ 10 кВ равно 50 мм^2 [50], для которого допустимый ток нагрузки равен 245 А.

По механической прочности на магистралях ВЛ с защищёнными проводами независимо от нормативной толщины стенки гололёда должны применяться провода номинальным сечением не менее 70 мм^2 [50].

Исходя из этого требования принимаем для выполнения ВЛ 10 кВ провод марки СИП-3 сечением 70 мм^2 .

Определим активную и реактивную мощности, передаваемые по трёхфазной трёхпроводной линии:

$$P_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cos \varphi = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ кВт}; \quad (5.3)$$

$$Q_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \sin \varphi = 100 \cdot 0,6 = 60 \text{ квар}; \quad (5.4)$$

5.3 Двухпроводная схема электроснабжения с использованием ТПЧФ

Электроснабжение объекта АПК осуществляется от трансформаторной подстанции ТП-1, на которой установлен повышающий трансформаторный преобразователь числа фаз ТПЧФ-1 с конденсаторными батареями на низкой стороне трансформатора (рисунок 2.1). ТПЧФ-1 мощностью 160 кВА, 0,4/10 кВ одновременно с повышением напряжения преобразует трёхфазный ток в однофазный ток. Электроэнергия передаётся к объекту по двухпроводной ВЛ 10 кВ к трансформаторной подстанции ТП-2, на которой установлен понижающий трансформаторный преобразователь числа фаз ТПЧФ-2 мощностью 160 кВА, 10/0,4. ТПЧФ-2 понижает напряжение до 0,4 кВ и одновременно преобразует однофазное напряжение в симметричную трехфазную систему напряжений. Выбор трансформатора с большей мощностью обусловлен более высокими потерями мощности в двухпроводной системе.

5.3.1 Расчёт подстанции ТП-2 с трансформаторным преобразователем числа фаз ТПЧФ-2

Трансформаторный преобразователь числа фаз ТПЧФ-2 выполняем на базе типового трёхфазного понижающего трансформатора типа ТМГ.

Определяем номинальный ток нагрузки:

$$I_H = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_L} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 152\text{A}, \quad (5.5)$$

где U_L – линейное напряжение ВЛ низкого напряжения, вольты.

Коэффициент трансформации трансформатора ТМГ 10/0,4 кВ:

$$n_2 = \frac{10}{0,4} = 25. \quad (5.6)$$

Фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора ТПЧФ-2 равны фазным напряжениям трёхфазного приёмника $U_a = U_b = U_c = 220\text{ В}$:

$$U'_a = U'_b = U'_c = 220\text{В}; \quad (5.7)$$

Однофазное напряжение на входе ТПЧФ-2:

$$U = U'_a 2n_2 = 220 \cdot 2 \cdot 25 = 11000\text{В}. \quad (5.8)$$

Напряжение на первичных обмотках трансформатора:

$$U_A = U_B = U_C = \frac{U}{2} = 5500\text{В}. \quad (5.9)$$

Сопротивление трёхфазной нагрузки:

$$Z = \frac{U_a}{I_H} = \frac{220}{152} = 1,450\text{м}. \quad (5.10)$$

Токи трёхфазной симметричной нагрузки:

$$I_a = I_b = I_c = \frac{U}{2n_2 Z} = \frac{11000}{2 \cdot 25 \cdot 1,45} = 152\text{А}. \quad (5.11)$$

Токи во вторичных обмотках трансформатора (3.109 – 3.110):

$$\underline{I}'_a = \underline{I}'_c = \frac{U}{4n_2 Z} [2e^{-j120^\circ} \cos \varphi - e^{-j\varphi}] = \frac{U}{4n_2 Z} 2e^{-j90^\circ}; \quad (5.12)$$

$$\left. \begin{aligned} I'_a = I'_c &= \frac{U}{2n_2 Z} = \frac{11000}{2 \cdot 25 \cdot 1,45} = 152\text{ А}; \\ I'_b &= \frac{U}{n_2 Z} = \frac{11000}{25 \cdot 1,45} = 304\text{ А}. \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

Токи в первичных обмотках трансформатора (3.119):

$$I_A = I_B = I_C = \frac{3U}{4n_2^2 Z} [\cos\varphi + j \sin(60^\circ + \varphi)] = \frac{3 \cdot 11000}{4 \cdot 25^2 \cdot 1,45} \cdot 0,89 = 8,1\text{А.} \quad (5.14)$$

Ток на входе ТПЧФ-2:

$$I = I_C = 8,1\text{А.} \quad (5.15)$$

Ёмкость первой конденсаторной батареи (3.77):

$$C_1 = \frac{4n_2 I_H \cos\varphi}{\sqrt{3}\omega U} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 152 \cdot 0,8 \cdot 10^6}{1,73 \cdot 314 \cdot 11 \cdot 10^3} = 2035\text{мкФ.} \quad (5.16)$$

Ёмкость второй конденсаторной батареи (3.81):

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{2n_2 I_H \sin(\varphi - 30^\circ)}{\sqrt{3}\omega U} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 152 \cdot \sin(36,87^\circ - 30^\circ) 10^6}{1,73 \cdot 314 \cdot 11 \cdot 10^3} = \\ &= \frac{50 \cdot 152 \cdot 0,12}{1,73 \cdot 3,14 \cdot 1,1} = 152,6\text{мкФ.} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Мощность первой конденсаторной батареи (3.164):

$$Q_1 = \frac{\sqrt{3}U^2 \cos\varphi}{2n_2^2 Z} = \frac{\sqrt{3}(11 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,8}{2 \cdot 25^2 \cdot 1,45} = 92394\text{вар} = 92,4\text{квар.} \quad (5.18)$$

Мощность второй конденсаторной батареи (3.81):

$$Q_2 = \frac{\sqrt{3}U^2 \sin(\varphi - 30^\circ)}{4n_2^2 Z} = \frac{1,73 \cdot (11 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,12}{4 \cdot 25^2 \cdot 1,45} = 4006 = 4,0\text{квар.} \quad (5.19)$$

Ток в первой конденсаторной батарее (3.94):

$$I_1 = \frac{U \cos\varphi}{n_2 Z} = \frac{11 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{25 \cdot 1,45} = 243\text{А;} \quad (5.20)$$

Ток во второй конденсаторной батарее (3.51):

$$I_2 = \frac{U \sin(\varphi - 30^\circ)}{2n_2 Z} = \frac{11 \cdot 10^3 \sin(36,87^\circ - 30^\circ)}{2 \cdot 25 \cdot 1,45} = \frac{440 \cdot 0,12}{2,9} = 18\text{А.} \quad (5.21)$$

5.3.2 Расчёт подстанции ТП-1 с трансформаторным преобразователем числа фаз ТПЧФ-1

Трансформаторный преобразователь числа фаз ТПЧФ-1 выполняем на базе типового трёхфазного трансформатора типа ТМГ. Коэффициент трансформации трансформатора 0,4/10 кВ:

$$n_1 = \frac{0,4}{10} = 0,04. \quad (5.22)$$

Напряжения на первичных обмотках повышающего трансформатора, фазные:

$$U_A = U_B = U_C = 220\text{В}. \quad (5.23)$$

Междуфазные:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_A \cdot \sqrt{3} = 380\text{В}. \quad (5.24)$$

Напряжения на вторичных обмотках трансформатора, фазные:

$$U_a = U_b = U_c = \frac{U_\phi}{n_1} = \frac{220}{0,04} = 5500\text{В}; \quad (5.25)$$

Междуфазные:

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_a \cdot \sqrt{3} = 1,73 \cdot 5500 = 9515\text{В}. \quad (5.26)$$

Напряжение на конденсаторных батареях:

$$U_1 = U_2 = U_\phi \cdot \sqrt{3} = 1,73 \cdot 220 = 380\text{В}. \quad (5.27)$$

Однофазные напряжение на выходе трансформатора:

$$U = \frac{2U_\phi}{n_1} = \frac{2 \cdot 220}{0,04} = 11000\text{В}. \quad (5.28)$$

Токи трёхфазного источника (2.79 – 2.87):

$$I'_A = I'_B = I'_C = \frac{2I_H}{3n_1} = \frac{2 \cdot 8,1}{3 \cdot 0,04} = 135\text{А}, \quad (5.29)$$

где $I_H = I = 8,1$ А из п. 5.3.1.

Токи конденсаторных батарей:

$$I_1 = \frac{4I_H \cos \varphi}{3n_1} = \frac{4 \cdot 8,1 \cdot 0,8}{3 \cdot 0,04} = 216\text{А}; \quad (5.30)$$

$$I_2 = \frac{4I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3n_1} = \frac{4 \cdot 8,1 \cdot \sin(66,87^\circ)}{3 \cdot 0,04} = \frac{32,4 \cdot 0,92}{0,12} = 248,4 \text{ А}. \quad (5.31)$$

Токи первичных обмоток трансформатора (2.113 – 2.119):

$$I_A = I_C = \frac{2I_H}{3n_1} = \frac{2 \cdot 8,1}{3 \cdot 0,04} = 135\text{А}; \quad (5.32)$$

$$I_B = \frac{4I_H}{3n_1} = \frac{4 \cdot 8,1}{3 \cdot 0,04} = 270\text{А}. \quad (5.33)$$

Токи вторичных обмоток трансформатора (2.129), (2.130):

$$I_a = I_b = I_c = I_H = 8,1\text{А}. \quad (5.34)$$

Ток в двухпроводной линии:

$$I_H = \frac{2U_\phi}{n_1 Z_H} = \frac{2 \cdot 220}{0,04 \cdot 1358} = 8,1\text{А}, \quad (5.35)$$

где $Z_H = \frac{U}{I_H} = \frac{11 \cdot 10^3}{8,1} = 1358 \text{ Ом}$.

Ёмкость первой конденсаторной батареи (2.68):

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{8I_H \cos\varphi}{3\sqrt{3}n_1^2 \omega U} = \frac{8 \cdot 8,1 \cdot 0,8 \cdot 10^6}{3 \cdot 1,732 \cdot 0,04^2 \cdot 314 \cdot 11 \cdot 10^3} = \\ &= \frac{51,84 \cdot 10^4}{287,15} = \frac{51,84 \cdot 10^2}{2,87} = 1806 \text{ мкФ}. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Ёмкость второй конденсаторной батареи (2.69):

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{8I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3\sqrt{3}n_1^2 \omega U} = \\ &= \frac{8 \cdot 8,1 \cdot \sin(66,87^\circ) \cdot 10^6}{3 \cdot 1,732 \cdot 0,04^2 \cdot 314 \cdot 11 \cdot 10^3} = \frac{59,62 \cdot 10^2}{2,87} = 2077 \text{ мкФ}. \end{aligned} \quad (5.37)$$

Мощность первой конденсаторной батареи (2.159):

$$Q_1 = \frac{4U_\phi I_H \cos\varphi}{\sqrt{3}n_1} = \frac{4 \cdot 220 \cdot 8,1 \cdot 0,8}{1,732 \cdot 0,04} = 82309 \text{ вар} = 82,3 \text{ квар}. \quad (5.38)$$

Мощность второй конденсаторной батареи (2.161):

$$Q_2 = \frac{4U_\phi I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{\sqrt{3}n_1} = \frac{4 \cdot 220 \cdot 8,1 \cdot \sin(66,87^\circ)}{1,732 \cdot 0,04} = 94656 = 94,7 \text{ квар}. \quad (5.39)$$

Если принять номинальный ток НН трансформатора 152 А (5.5) и ток стороны ВН $152/25 = 6$ А, то имеем для ТПЧФ-1 недогруженные обмотки фаз А и С с относительными токами $135/152 = 0,89I_{\text{ном}}$ (5.29) и перегруженная в фазе В

$270/152 = 1,78I_{\text{НОМ}}$ (5.33), а также перегруженные обмотки стороны ВН (ток обмотки равен $8,1/6 = 1,35 I_{\text{НОМ}}$). Тепловыделение, в относительных единицах в обмотках трансформатора составит:

$$0,89^2 + 0,89^2 + 1,78^2 + 3 \cdot 1,35^2 = 10,2 \text{ о. е.} \quad (5.40)$$

При симметричном номинальном режиме:

$$1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 = 6 \text{ о. е.} \quad (5.41)$$

Таким образом мощности трансформаторов для ТПЧФ должны быть не 100 кВА, а не менее 160 кВА.

Номинальная мощность, передаваемая по двухпроводной линии:

$$S_{л_2} = U_{л} I_{л} = U I_{н} = 11 \cdot 10^3 \cdot 8,1 = 89,1 \cdot 10^3 \text{ ВА} = 89 \text{ кВА}, \quad (5.42)$$

где $U_{л} = U = 11 \text{ кВ}$ – напряжение двухпроводной линии;

$I_{л} = I_{н} = 8,1 \text{ А}$ – ток линии.

Номинальная мощность, передаваемая по трёхфазной трёхпроводной линии:

$$S_{л_1} = \sqrt{3} U_{\text{ВЛ(НОМ)}} I_{\text{ВЛ}_{10}} = 1,73 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 5,77 = 100 \cdot 10^3 \text{ ВА} = 100 \text{ кВА} \quad (5.43)$$

Соотношение мощностей, передаваемых по линиям второго и первого вариантов:

$$\frac{S_{л_2}}{S_{л_1}} = \frac{89}{100} = 0,89 (89 \%) \quad (5.44)$$

В связи с тем, что токи высоковольтных линий примерно равны по величине (5,77 А – в первом варианте, и 8,1 А – во втором), сечение проводов в обоих вариантах принимаем одинаковым – 70 мм².

5.3.3 Выбор конденсаторных установок для трансформаторных преобразователей числа фаз

По результатам расчёта ёмкостей и реактивных мощностей конденсаторных батарей C_1 и C_2 для ТПЧФ-1 и C_1 (C_3), C_2 (C_4) для ТПЧФ-2 выбираем по каталогу – Силовые конденсаторы [55] конденсаторные установки. Обозначения ёмкостей для

ТПЧФ-2 в скобках через C_3 и C_4 соответствует обозначениям ёмкостей на схеме (рисунок 2.1) двухпроводной системы электропередачи.

В результате теоретических исследований трансформаторных преобразователей числа фаз ТПЧФ-1 (глава 2) и ТПЧФ-2 (глава 3) установлено, что симметрирующие конденсаторы трансформаторных преобразователей, установленные на низкой стороне трансформаторов, должны быть регулируемые, ёмкость конденсаторных установок, должна автоматически регулироваться с изменением мощности нагрузки и с изменением $\cos\varphi$. Такие конденсаторные установки типа УКМ 58 производятся в России на конденсаторном заводе «Электроинтер» (г. Серпухов Московской области). Эти установки низкого напряжения, регулируемые, предназначены для повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий и распределительных сетей, а также для автоматического регулирования мощности.

Выбранные по каталогу [55] конденсаторные установки представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Конденсаторные установки ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2

Обозначение ёмкостей ТПЧФ	Величина ёмкости	Мощность	Ном. напряжение	Тип конденсаторной установки
–	мкФ	квар	В	
C_1	1806	82	400	УКМ58-0,4(2P)-96-4-У3
C_2	2077	95	400	УКМ58-0,4(2P)-96-4-У3
C_3	2035	93	400	УКМ58-0,4(2P)-96-4-У3
C_4	153	4	400	УКМ58-0,4(2P)-96-4-У3

Примечание – По заказу возможно изготовление конденсаторных установок других мощностей и ступеней регулирования.

5.4. Капитальные затраты на электроснабжение объекта по двум вариантам

В рассматриваемых двух вариантах электроснабжения объекта АПК приняты в первом варианте трансформаторы типа ТМГ-100, номинальной мощностью 100 кВА и второй вариант ТМГ-160, номинальной мощностью 160 кВА.

Высоковольтная линия ВЛ 10 кВ в первом варианте трёхфазная трёхпроводная выполнена защищёнными проводами марки СИП-3 сечением 70 мм².

Высоковольтная линия ВЛ 11 кВ во втором варианте двухпроводная выполнена проводами марки СИП-3 сечением 70 мм².

Капитальные затраты на электроснабжение объекта по рассматриваемым двум вариантам будут отличаться в связи с различными затратами на ВЛ 11 кВ, так как в первом варианте ВЛ 10 кВ трёхпроводная, а во втором варианте ВЛ 11 кВ – двухпроводная, выполняемые проводом одинакового сечения (70 мм²).

Капитальные затраты на потребительские подстанции будут отличаться стоимостью силовых трансформаторов. Также во втором варианте ТПЧФ содержит конденсаторные батареи, которые являются фазопреобразующими элементами. Они же одновременно являются устройствами для компенсации реактивной мощности трёхфазной нагрузки, что также необходимо учесть в затратах.

Таким образом, трансформаторные подстанции по первому и второму вариантам с точки зрения капитальных затрат будут отличаться на разницу стоимости силовых трансформаторов, стоимости конденсаторных установок и арматуры (изоляторов, креплений) ВЛ.

Рассчитываем капитальные затраты на ВЛ 10 (11) кВ протяжённостью 10 км:

по первому варианту – трёхпроводная ВЛ 10 кВ;

по второму варианту – двухпроводная ВЛ 11 кВ.

Подробные расчёты сметной стоимости строительства приведены в приложении Д.

Итоговые результаты расчётов сметной стоимости строительства ВЛ 10 (11) кВ приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. – Сметная стоимость строительства ТП, ВЛ 10(11) кВ на 10 км

Виды затрат	Стоимость в тыс. руб	
	1 вариант (трёхпроводная линия)	2 вариант (двухпроводная линия)
Общая сметная стоимость	40719,4	27758,3
Стоимость ТП с учетом КУ (2-ой вар)	1824*2	1886*2+274
Сметная стоимость ВЛ	37071,4	23712,3
В том числе:		
Строительных работ	35166,9	22353,9
Монтажных работ	968,7	801,1
Прочих затрат	935,8	557,4
Разность сметной стоимости по 1 и 2 вариантам	12961,1	
Отношение сметной стоимости по 1 и 2 вариантов	1,47	

Из таблицы 5.2 видно, что сметная стоимость строительства ТП-100 кВА и трёхпроводной ВЛ 10 кВ выше сметной стоимости строительства ТП-160кВА с КУ и двухпроводной ВЛ 11 кВ на 12961,1 тыс. руб. или иначе, двухпроводная ВЛ 11 кВ в 1,47 раза дешевле трёхпроводной ВЛ 10 кВ. Можно сделать вывод, что капитальные затраты ниже при строительстве ВЛ с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения отдельных удалённых от источников питания объектов, особенно расположенных в труднодоступных районах.

5.5. Выводы по пятой главе

1. Двухпроводная система электроснабжения с трансформаторными преобразователями числа фаз с конденсаторными установками на низкой стороне трансформаторов выполняется на типовом электрооборудовании: в ней применяются трёхфазные трансформаторы и низковольтные регулируемые конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности.
2. При одинаковом входном напряжении в трёхпроводной и двухпроводной системах (0,4 кВ), напряжение на выходе одинаковых трансформаторов разное: в трёхфазной системе с коэффициентом трансформации $n=25 - 10$ кВ; в двухпроводной системе – 11 кВ.

3. За счёт повышенного в 1,1 раза напряжения в линии в двухпроводной системе передаваемая мощность достигает 90 % от мощности трёхпроводной системы.
4. Капитальные затраты ниже в 1,47 раза при строительстве двухпроводной ВЛ с трансформаторными преобразователями числа фаз по сравнению с трёхпроводной ВЛ для электроснабжения отдельных удалённых от источников питания объектов, особенно расположенных в труднодоступных районах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа существующих неполнофазных электроэнергетических систем сделан вывод о возможности использования двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз, с фазопреобразующими элементами на низковольтной стороне трансформатора, разработанной в СПбГАУ (патент на изобретение № 2532534). Включение фазопреобразующих конденсаторов на низковольтной стороне трансформаторов позволяет использовать в высоковольтных трансформаторных преобразователях числа фаз низковольтные конденсаторы.
2. Созданные математические модели трансформаторных преобразователей числа фаз ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 позволили получить зависимости величин фазопреобразующих элементов, напряжений, токов и мощностей первичных и вторичных обмоток трансформаторов от нагрузки. Разработана методика анализа трансформаторных преобразователей числа фаз с фазопреобразующими элементами на низковольтной стороне трансформаторов, выполнен анализ повышающего и понижающего трансформаторов.
3. Экспериментальные исследования двухпроводных систем электропередачи подтвердили разработанные математические модели и методику анализа трансформаторных преобразователей числа фаз с фазопреобразующими элементами на низковольтной стороне трансформаторов. Сравнения расчетных и опытных значений параметров фазопреобразующих элементов преобразователей показали, что их максимальное расхождение не превышает 8 %.
4. При сравнении двух вариантов сметная стоимость на строительство трехпроводной ВЛ 10 кВ составляет 40719,4 тыс. руб., что выше в 1,47 раза сметной стоимости на строительство двухпроводной ВЛ 11 кВ 27758,3 тыс. руб. Таким образом, имеется преимущество двухпроводных систем электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз перед трехпроводными системами электропередачи.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Современные трансформаторные преобразователи числа фаз, применяемые в двухпроводных системах электропередачи, обладают значительными потерями мощности в связи с тем, что первичные обмотки трёхфазного трансформатора соединены последовательно. Необходимо изменить конструкцию трансформаторного преобразователя числа фаз таким образом, чтобы его КПД был сравним с КПД обычного трёхфазного трансформатора. Эта задача является целью моей НИР по совершенствованию ТПЧФ двухпроводных линий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АПК	– Агропромышленный комплекс
ТПЧФ	– Трансформаторный преобразователь числа фаз
ТС	– Трансформатор силовой
ВЛ	– Воздушная линия
ДПЗ	– Два провода - земля
ОЛ	– Отходящая линия
ОПЗ	– Один провод - земля
ЛЭП	– Линия электропередачи
АПВ	– Автоматическое повторное включение
РТП	– Распределительно-трансформаторная подстанция
ТП	– Трансформаторная подстанция
МАИН	– Многоуровневый автономный инвертор напряжения
ТСУ	– Трансформаторное симметрирующее устройство
МДС	– Магнитодвижущая сила
ВН	– Высокое напряжение
НН	– Низкое напряжение
КРМ	– Компенсация реактивной мощности
МУ	– Магнитный усилитель
СИП	– Самонесущий изолированный провод
КПД	– Коэффициент полезного действия
ТМГ	– Трансформатор масляный герметичный
УКМ	– Установка конденсаторная регулируется по реактивной мощности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 658654 А1 СССР, МПК H02J 3/26. Симметрирующее устройство : № 2468354 : заявлено 28.03.1977 : опубликовано 25.04.1979, Бюл. № 15 / Косоухов Ф. Д. ; заявитель Ленинградский сельскохозяйственный институт. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.
2. Авторское свидетельство № 780111 А1 СССР, МПК H02K 47/30, H02M 5/32. Трансформаторный преобразователь числа фаз с вращающимся магнитным полем : № 2512334 : заявлено 27.07.1977 : опубликовано 15.11.1980, Бюл. № 42 / Косоухов Ф. Д., Пославский Б. Т. ; заявитель Ленинградский сельскохозяйственный институт. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Бамдас А. М. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз / А. М. Бамдас, В. А. Кулинич, С. В. Шапиро. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 208 с. – Текст : непосредственный.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : учебник для энергетических и электротехнических вузов и факультетов : в 3 частях / Л. А. Бессонов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1967. – 776 с. – Текст : непосредственный.
5. Вольдек А. И. Электрические машины : учебник для электротехнических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергия, Ленингр. отд-ние, – 1974. – 839 с.
6. ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения : утвержден Постановлением Госстандарта СССР от 16 декабря 1987 г. № 4566 : взамен ГОСТ 13109-67 : дата введения 1989-01-01 : утратил силу : взамен введен ГОСТ 13109-97. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 23 с. – Текст : непосредственный.
7. ГОСТ 3484.1-88 (СТ СЭВ 1070-78). Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний (с Изменением № 1) : издание официальное : утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 30 августа 1988 г. № 3051 (ред. 15.05.1991) : взамен ГОСТ 3484-77 в части разд. 1-7 : дата введения 1990-01-01 / разработан и внесен Министерством электротехнической про-

мышленности СССР. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. – 2024. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012449> (дата обращения: 11.10.2024).

8. Двухпроводная система электропередачи трёхфазного тока / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин [и др.]. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2018. – № 10. – С. 37–44.

9. Епифанов А. П. Электрические машины : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности 110302 – «Электрификация и автоматизация сельского хоз-ва». – Санкт-Петербург : Лань, 2006. – 262 с. – ISBN 5-8114-0669-X. – Текст : непосредственный.

10. Жуков Л. А. Дискретное быстродействующее регулирование мощности батарей статических конденсаторов с помощью тиристорных выключателей / Л. А. Жуков, Н. И. Карташов, Ю. Т. Рыжов, А. И. Дорошенко. – Текст : непосредственный // Электричество. – 1977. – №7. – С. 68–71.

11. Зотин О. Грядущий ренессанс постоянного тока / О. Зотин. – Текст : непосредственный // Энергетика и промышленность России. – 2013. – 16-28 февраля (№ 04 (216)). – С. 51 ; 16-31 марта (№ 06 (218)). – С. 49 ; 16-30 апреля (№ 08 (220)). – С. 50.

12. Измерение симметричных составляющих напряжений и токов в трехфазной электрической сети / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов [и др.]. – Текст : непосредственный // Управление качеством электрической энергии : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 23–25 ноября 2016 г. / МЭИ (Московский энергетический институт). – Москва : Центр полиграфических услуг «Радуга», 2017. – С. 170–176.

13. Использование неметаллических сред для передачи электрической энергии / Д. С. Стребков, А. И. Некрасов, С. В. Авраменко, О. А. Рощин. – Текст : непосредственный / Научные труды Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. – Москва, 2002. – Т. 88 : Электрификация сельского хозяйства. – С. 83–92.

14. Коваленко П. В. Разработка и исследование трансформаторных симметрирующих устройств для снижения несимметрии в сельских сетях : 05.09.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коваленко Павел Васильевич. – Ленинград, Пушкин, 1982. – 219 с. – Текст : непосредственный.
15. Коваленко П. В. Энергетические показатели трансформаторных симметрирующих устройств / П. В. Коваленко. – Текст : непосредственный // Научные труды Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград, 1981. – Т. 404 : Электрификация и автоматизация технологических процессов в животноводстве и растениеводстве. – С. 80–85.
16. Корчагин П. Т. Надёжность электроснабжения удалённых потребителей / П. Т. Корчагин, Д. М. Таранков. – Текст : непосредственный // Сельский механизатор. – 2014. – № 3. – С. 28–30.
17. Корчагин П. Т. Электроснабжение удалённых сельскохозяйственных потребителей по однопроводной сети 10 кВ : специальность 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве (по техническим наукам)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корчагин Павел Тимофеевич ; Донской государственный аграрный университет, Азово-Черноморский инженерный институт. – Зерноград, 2016. – 19 с. – Текст : непосредственный.
18. Косоухов Ф. Д. Анализ схем трансформаторного преобразователя числа фаз / Ф. Д. Косоухов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Электромеханика. – 1979. – № 7. – С. 639–646.
19. Косоухов Ф. Д. Анализ схемы трансформаторного симметрирующего устройства с ёмкостными элементами / Ф. Д. Косоухов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Электромеханика. – 1981. – № 27. – С. 194–199.
20. Косоухов Ф. Д. Двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения удаленных от источников электроэнергии объектов АПК / Ф. Д. Косоухов, Н. Ю. Криштопа, А. Л. Боршнин. – Текст : непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 58. – С. 154–166.

21. Косоухов Ф. Д. Методы расчёта, способы и средства снижения потерь электрической энергии и повышения её качества в сельских распределительных сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке : специальность 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Косоухов Федор Дмитриевич ; Ленинградский сельскохозяйственный институт. – Ленинград, 1989. – 509 с. – Текст : непосредственный.
22. Косоухов Ф. Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях / Ф. Д. Косоухов, И. В. Наумов ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. – Иркутск : Иркут. гос. с.-х. акад., 2003. – 259 с. – Текст : непосредственный.
23. Косоухов Ф. Д. Оптимальные режимы работы статического преобразователя числа фаз системы В. А. Терехина. – Текст : непосредственный // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград, 1964. – Т. 94 : Механизация и электрификация сельского хозяйства. – С. 196–202.
24. Косоухов Ф. Д. Расчет преобразователей числа фаз с симметричными по числу витков обмотками трансформатора / Ф. Д. Косоухов, Б. А. Морозов. – Текст : непосредственный // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград, 1974. – Т. 225 : Электроснабжение сельского хозяйства. – С. 49–58.
25. Косоухов Ф. Д. Сравнительное исследование схем двухэлементных статических преобразователей числа фаз для питания трёхфазной сельскохозяйственной нагрузки от однофазных сетей / Косоухов Федор Дмитриевич : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук ; Ленинградский сельскохозяйственный институт. – Ленинград, Пушкин, 1965. – 153 с. – Текст : непосредственный.
26. Косоухов Ф. Д. Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз / Ф. Д. Косоухов, М. Ю. Теремецкий, А. Л. Борошнин. – Текст : непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 56. – С. 133–145.

27. Костенко М. П. Электрические машины : учебник для энергетических институтов. Часть общая. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1944. – 815 с. – Текст : непосредственный.
28. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1972. – 231 с. – Текст : непосредственный.
29. Морозов Б. А. Исследование трансформаторных преобразователей числа фаз для электроснабжения трёхфазных сельскохозяйственных потребителей от однофазных сетей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Морозов Борис Александрович ; Министерство сельского хозяйства, Ленинградский сельскохозяйственный институт. – Ленинград, 1972. – 131 с. – Текст : непосредственный.
30. Морозов Б. А. Расчет фазопреобразующих элементов трансформаторного преобразователя числа фаз / Б. А. Морозов. – Текст : непосредственный // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград, 1970. – Т. 135 : Электрификация сельского хозяйства. – С. 68–73.
31. Основы теории цепей : учебник для электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. – ISBN 5-283-00523-2. – Текст : непосредственный.
32. Патент № 2143775 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00. Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 99105452/09 : заявлено 25.03.1999 : опубликовано 27.12.1999 / Стребков Д. С., Авраменко С. В., Некрасов А. И. ; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.
33. Патент № 2161850 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00, H04B 7/185. Способ и устройство передачи электрической энергии : № 99115298/09 : заявлено 14.07.1999 : опубликовано 10.01.2001, Бюл. № 1 / Стребков Д. С., Авраменко С. В., Некрасов А. И. ; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.

34. Патент № 2183376 С2 Российская Федерация, МПК H02J 17/00. Способ и устройство для передачи электрической энергии (варианты) : № 2000117147/09 : заявлено 03.07.2000 : опубликовано 10.06.2002 / Стребков Д. С., Авраменко С. В., Некрасов А. И. ; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – 17 с. : ил. – Текст : непосредственный.
35. Патент № 2255405 С2 Российская Федерация, МПК H02J 17/00. Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 2003103618/09 : заявлено 07.02.2003 : опубликовано 27.06.2005, Бюл. № 18 / Стребков Д. С., Бурганов Ф. С., Авраменко С. В. [и др.] ; заявитель Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ. – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
36. Патент № 2255406 С2 Российская Федерация, МПК H02J 17/00. Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 2003105178/09 : заявлено 21.02.2003 : опубликовано 27.06.2005, Бюл. № 18 / Стребков Д. С., Авраменко С. А., Некрасов А. И. ; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ). – 24 с. : ил. – Текст : непосредственный.
37. Патент № 2273939 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 2004135011/09 : заявлено 01.12.2004 : опубликовано 10.04.2006, Бюл. № 10 / Стребков Д. С., Некрасов А. И. ; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ). – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
38. Патент № 2310964 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 2006104036/09 : заявлено 10.02.2006 : опубликовано 20.11.2007, Бюл. № 32 / Стребков Д. С. ; заявитель Российская академия сельскохозяйственных наук, Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии). – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.

39. Патент № 2340064 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство для передачи электрической энергии (варианты) : № 2007111459/09 : заявлено 29.03.2007 : опубликовано 27.11.2008, Бюл. № 33 / Стребков Д. С. ; заявитель Российская академия сельскохозяйственных наук, Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии). – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.
40. Патент № 2341860 С2 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство для передачи электрической энергии (варианты) : № 2006123695/09 : заявлено 04.07.2006 : опубликовано 20.12.2008, Бюл. № 35 / Петрик В. И., Стребков Д. С. – 16 с. : ил. – Текст : непосредственный.
41. Патент № 2366057 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство передачи электроэнергии : № 2008115956/09 : заявлено 25.04.2008 : опубликовано 27.08.2009, Бюл. № 24 / Стребков Д. С., Подосинников А. А., Подосинников А. А. ; заявитель Российская академия сельскохозяйственных наук, Государственное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии). – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
42. Патент № 2395147 С1 Российская Федерация, МПК H02J 3/04 (2006.01). Однопроводная распределительная сеть : № 2009121897/09 : заявлено 08.06.2009 : опубликовано 20.07.2010, Бюл. № 20 / Таранов М. А., Медведько Ю. А., Медведько А. Ю. ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия» (ФГОУ ВПО АЧГАА). – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
43. Патент № 2409883 С1 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 2009133950/07 : заявлено 11.09.2009 : опубликовано 20.01.2011, Бюл. № 2 / Стребков Д. С., Трубников В. З., Некрасов А. И., Некрасов А. А. ; заявитель Российская академия сельскохозяйственных наук Государственное научное учреждение Всероссийский научно-

исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии). – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.

44. Патент № 2459340 С2 Российская Федерация, МПК H02J 17/00 (2006.01). Способ и устройство для передачи электрической энергии : № 2010138698/07 : заявлено 21.09.2010 : опубликовано 20.08.2012, Бюл. № 23 / Стребков Д. С., Рощин О. А., Богданов А. Ю. ; заявитель Российская академия сельскохозяйственных наук Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии). – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

45. Патент № 2516461 С2 Российская Федерация, МПК H02H 7/09 (2006.01). Устройство симметрирования неполнофазных режимов на линии 10 кВ для удаленных потребителей : № 2012134359/07 : заявлено 10.08.2012 : опубликовано 20.05.2014, Бюл. № 14 / Таранов М. А., Корчагин П. Т. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия» (ФГБОУ ВПО АЧГАА). – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

46. Патент № 2532534 С2 Российская Федерация, МПК H02J 3/04 (2006.01). Устройство передачи электрической энергии трехфазного тока по двухпроводной линии : № 2012153043/07 : заявлено 07.12.2012 : опубликовано 10.11.2014, Бюл. № 17 / Косоухов Ф. Д., Филиппов А. О., Васильев Н. В., Борошнин А. Л. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет». – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.

47. Поздняков В. А. К вопросу о применении постоянного тока высокого напряжения для электроснабжения сельского хозяйства / В. А. Поздняков. – Текст : непосредственный // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград, 1964. – Т. 94 : Механизация и электрификация сельского хозяйства. – С. 238–243.

48. Поздняков В. А. Электропередача постоянного тока высокого напряжения для электроснабжения сельского района в Вологодской области / В. А. Поздняков. – Текст : непосредственный // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград : Колос, 1965. – Т. 101 : Электрификация сельского хозяйства. – С. 26–34.
49. Пославский Б. Т. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей с применением преобразователей числа фаз с вращающимся магнитным полем : специальность 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пославский Богдан Тимофеевич. – Львов, 1977. – 226 с.
50. Пособие по проектированию воздушных линий электропередачи напряжением 0,38-20 кВ с самонесущими изолированными и защищенными проводами. Кн. 4 : Система защищенных проводов напряжением 6-20 кВ, т. 1 : Одноцепные и двухцепные железобетонные опоры / Логинова С. Е., Логинов А. В., Ударов В. М. ; Научно-технический центр электроэнергетики, РОСЭП. – Редакция 5. – Санкт-Петербург : ENSTO, 2013. – 248 с. – На обложке: Том 1 : Конструкции одноцепных и двухцепных железобетонных опор – Текст : непосредственный.
51. Приборы для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии. Энергомонитор-3.3Т1 : руководство по эксплуатации : МС3.055.028 РЭ / Научно-производственное предприятие Марс-Энерго. – Редакция 11. – Б. м. : б. и., 2016. – 120 с. – Текст : электронный. – URL: <https://www.mars-energo.ru/assets/files/re-em-33t1-red11.pdf> (дата обращения: 04.10.2024).
52. Расчёт потерь электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Г. Гущинский [и др.]. – Текст : непосредственный // Энергоэксперт. – 2018. – №2 (66). – С. 27–30.
53. Рокотян С. С. Передача электрической энергии на дальние расстояния / С. С. Рокотян. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. – 79 с. – Текст : непосредственный.
54. Роцин О. А. Разработка резонансной системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей малой мощности : специальность 05.20.02 «Электротех-

нологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рощин Олег Алексеевич ; Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук. – Москва, 2006. – 21 с. – Текст : непосредственный.

55. Силовые конденсаторы : каталог. – Санкт-Петербург : Электроинтер, 2006. – 15 с. – Текст : непосредственный.

56. Силовые трансформаторы : каталог. – Санкт-Петербург : МИТЭК, 2006. – 73 с. – Текст : непосредственный.

57. Симметрирование однофазных нагрузок в сельских электрических сетях / Ф. Д. Косоухов, А. О. Филиппов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 2. – С. 9–12.

58. Система резонансной однопроводной передачи электрической энергии от возобновляемых источников / М. А. Шахраманьян, Д. С. Стребков, Л. Ю. Юферов, Ю. А. Прошкин. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2016. – № 11. – С. 4–6.

59. Совершенствование систем электроснабжения удалённых от источников электроэнергии объектов АПК, с помощью двухпроводных систем с трансформаторными преобразователями числа фаз / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Международной академии аграрного образования. – Санкт-Петербург, 2018. – Вып. № 41, т. 1. – С. 109–115.

60. Стальнов П. В. Применение статических преобразователей числа фаз для питания трёхфазных потребителей от однофазных сетей / П. В. Стальнов, Б. А. Морозов, Ф. Д. Косоухов. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1968. – № 5. – С. 21–25.

61. Стальнов П. В. Трансформаторный преобразователь однофазной системы в трехфазную систему / П. В. Стальнов, Ф. Д. Косоухов, Б. А. Морозов. – Текст : непосредственный // Записки Ленинградского сельскохозяйственного института. – Ленинград, 1970. – Т. 135 : Электрификация сельского хозяйства. – С. 57–62.

62. Стребков Д. С. О возможности однопроводной передачи электроэнергии / Д. С. Стребков, С. В. Авраменко, А. И. Некрасов. – Текст : непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 2004. – № 4. – С. 35–36.
63. Стребков Д. С. Резонансные методы передачи электрической энергии / Д. С. Стребков, А. И. Некрасов ; Российская академия сельскохозяйственных наук, Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2004. – 186 с. – ISBN 5-85941-003-4. – Текст : непосредственный.
64. Стребков Д. С. Экспериментальные модели резонансных систем передачи электроэнергии / Д. С. Стребков, Л. Ю. Юферев, О. А. Рощин. – Текст : непосредственный // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве / Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства [и др.]. – Москва, 2010. – Ч. 1. – С. 295–301.
65. Терехин В. А. Новое решение проблемы электромолотьбы / В. А. Терехин. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1935. – № 5. – С. 23–25.
66. Терехин В. А. Однопроводные сельскохозяйственные электрические сети / В. А. Терехин. – Текст : непосредственный // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1936. – № 4. – С. 10–12.
67. Терехин-Федотов В. А. Электрификация лесоразработок : (Однопроводная система центрального электроснабжения) / инж. В. А. Терехин ; под редакцией инж. М. К. Цупрова ; Научно-исследовательский сектор и научно-методический кабинет при Лесотехнической академии им. С. М. Кирова. – Ленинград : Б. и., 1939. – 96 с. – Текст : непосредственный.
68. Филиппов А. О. Снижение потерь электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ с помощью трансформаторного симметрирующего устройства : специальность 05.20.20 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филиппов Антон Олегович ; Санкт-Петербургский государственный аграрный уни-

верситет. – Санкт-Петербург, Пушкин, 2010. – 136, [6] с. – Текст : непосредственный.

69. Филиппов А. О. Трансформаторный преобразователь числа фаз для питания трёхфазных электродвигателей от однофазной сети / О. А. Филиппов. – Текст : непосредственный // Работы молодых специалистов ОАО «СевЗап НТЦ» : II Всероссийский конкурс молодых специалистов инженерного профиля в области электроэнергетики, Краснодарский край, 18–22 сентября 2007 года. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 18–32.

70. Филиппов А. О. Экспериментальное исследование трансформаторного симметрирующего устройства / А. О. Филиппов. – Текст : непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2010. – № 19. – С. 364–368.

71. Филиппов А. О. Электроснабжение сварочных трансформаторов через трансформаторное симметрирующее устройство / А. О. Филиппов. – Текст : непосредственный // Энергетический вестник Санкт-Петербургского государственного аграрного университета : сборник научных трудов / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 91–98.

72. Шидловский А. К. Резонансные системы передачи электрической энергии / А. К. Шидловский. – Текст : непосредственный // Энергетика и промышленность России. – 2003. – Ноябрь (№ 11 (39)). – С. 8–11.

73. Шидловский А. К. Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами / А. К. Шидловский, Г. А. Москаленко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 202 с. – Текст : непосредственный.

74. Шидловский А. К. Трансформаторные схемы симметрирования / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Вопросы теории и расчёта устройств преобразовательной техники : сборник статей. – Киев : Наукова думка, 1968. – С. 101–108.

75. Электропередача постоянного тока как элемент энергетических систем / Л. Р. Нейман, С. Р. Глинтерник, А. В. Емельянов, В. Г. Новицкий ; Академия наук

СССР, Институт электромеханики. – Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, Ленингр. отд-ние, 1962. – 340 с. – Текст : непосредственный.

76. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке : монография / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин [и др.]. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. – 276 с. – ISBN 978-5-8114-2119-0. – Текст : непосредственный.

77. Энергосбережение при транспортировке электрической энергии по линиям 0,38 кВ при несимметричной нагрузке / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов [и др.]. – Текст : непосредственный // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 5 (44). – С. 64–71.

78. Analysis of a transformer converter of the number of phases with symmetric elements on the low side of the transformer / N. V. Vasilev, F. D. Kosoukhov, V. A. Ruzhev [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/659/1/012112 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Zernograd, Rostov Region, 27-28 august 2020 year. – Zernograd, Rostov Region, 2021. – P. 012112.

79. Investigation of 20 kw, 6,8 kv, 80 mkm Single-Wire Electric Power System / D. S. Strelkov, S. V. Avramenko, A. L. Nekrasov, O. A. Roshchin // New Energy Technologies Issue. – 2002. – Vol. 6, – P. 52–54.

80. New Results of Development and Testing of Single-Wire Electric Power / D. S. Strelkov, S. V. Avramenko, A. I. Nekrasov [et al.] // New Energy Technologies Issue. – 2002. – № 5 (8) (september-october). – P. 17–19.

81. Patent 1335603 A France, Int. Cl. H01F30/14. Transformateur statique monophasé – triphasé : № 903620 : filed 11.07.1962 : published 23.08.1963, Bul. № 34 : expired / Brisseau Jean-Paul.

82. Patent 1350762 A France, Int. Cl. H01F30/14. Dispositif statique de repartition d'une charge monophasée sur les trois phases d'un systeme triphase : № 918808 : filed 17.12.1962 : published 31.01.1964 : expired / Babled Frederic Leon Gustave.

83. Patent 1363337 A France, Int. Cl. H01F30/14. Dispositif d'alimentation en courant triphasé à partir d'une source monophasée : № 933190 : filed 30.04.1963 : published 12.06.1964, Bul. № 24 : expired / Latuilerie Franck.

84. Patent 3375429 A United States, Int. Cl. H01F30/14, Cl. US 321/57. Phase converting power transformers : № 59131266 : filed 01.11.1966 : published 26.03.1968 : expired / Pagano Fernando.
85. Patent 3527995 A United States, Int. Cl. H02M5/27, H02P27/06, Cl. US 321/7. Single-phase to polyphaser conversion system : № 3527995D : filed 12.04.1967 : published 08.09.1970 : expired / Lee William H , Stotzer Roger H. ; owner Harris Graphics Corporation ; applicant Harris Intertype Corporation.
86. Single-Wire Electric Power System / D. S. Strebkov, S. V. Avramenko, A. I. Nekrasov, O. A. Roshchin // New Energy Technologies Issue. – 2003. – №1 (10) (january-february). – P. 50.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ И ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ



656038, г. Барнаул, Обской бульвар, 30
Тел.: +7 (3852) 22-39-51
Контактный центр: 8 (800) 350-55-66
e-mail: kanz@altaiensb.ru
www.altaiensb.ru

АКТ

О внедрении некоторых результатов кандидатской диссертационной работы Борошнина Александра Леонидовича

Была рассмотрена «Методика расчета двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения удаленных от источников электроэнергии объектов АПК», разработанная Борошным А.Л. под руководством доктора технических наук профессора Ф. Д. Косоухова, и составлен настоящий акт о том, что данная методика может быть принята к внедрению в зоне ответственности гарантирующего поставщика АО Алтайэнергосбыт: Алтайском крае и Республике Алтай для расчета конкретных двухпроводных систем электропередачи.

Считаю целесообразным применение двухпроводных систем электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения, удаленных от источников электроэнергии объектов АПК, так как капитальные затраты на строительство высоковольтных двухпроводных систем электропередачи до 1,5 раза меньше по сравнению с высоковольтной трехпроводной системой электропередачи

Заместитель генерального директора
по информационным технологиям

 А.С. Гусев



Гусев Алексей Сергеевич
+7 (905) 9894689

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО



Утверждаю

Начальник службы эксплуатации электрических сетей


 _____ А.В. Чайка

Акт о внедрении

некоторых результатов кандидатской диссертационной работы

Борошнина Александра Леонидовича

Комиссия в составе:

Председатель:

Начальник службы эксплуатации электрических сетей А.В. Чайка

Члены комиссии:

Начальник службы релейной защиты и автоматики А.Ю. Христов

Руководитель департамента по транспортировке электрической энергии Ю.И. Дундукова

Рассмотрела на заседании технического совета АО «ОЭК» «Методику расчета двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения удаленных от источников электроэнергии объектов АПК», разработанную Борошным А.Л. под руководством доктора технических наук профессора Ф.Д. Косоухова, и составила настоящий акт о том, что эта методика может быть применима в АО «ОЭК» для расчета конкретных двухпроводных систем электропередачи.

Комиссия считает обоснованно целесообразным применение в отдельных случаях двухпроводных систем электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения, удаленных от источников электроэнергии объектов АПК, так как капитальные затраты на строительство высоковольтных двухпроводных систем электропередачи, согласно представленному технико-экономическому обоснованию, до 1,5 раза меньше по сравнению с высоковольтной трехпроводной системой электропередачи.

Председатель комиссии: А.В. Чайка

Члены комиссии: А.Ю. Христов

Ю.И. Дундукова



Общество с ограниченной
ответственностью
«Рязанская городская муниципальная
энергосбытовая компания»



390000, г. Рязань, ул. Радищева, д. 61
8 (4912) 70-20-10
info@rgmek.ru, www.РГМЭК.РФ
ИНН 6229054695, КПП 623401001

Утверждаю


Акт

О внедрении некоторых результатов кандидатской диссертационной работы
Борошнича Александра Леонидовича

Была рассмотрена «Методика расчета двухпроводной системы электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения удаленных от источников электроэнергии объектов АПК», разработанная Борошным А.Л. под руководством доктора технических наук профессора Ф. Д. Косоухова, и составлен настоящий акт о том, что эта методика принята в план к внедрению в ООО «РГМЭК» для расчета конкретных двухпроводных систем электропередачи.

Считаем целесообразным применение двухпроводных систем электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения, удаленных от источников электроэнергии объектов АПК, так как капитальные затраты на строительство высоковольтных двухпроводных систем электропередачи до 1,5 раза меньше по сравнению с высоковольтной трехпроводной системой электропередачи

«заместитель директора по ИТ Кокарев О.А.»



«10.06.2024г.»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2532534

**УСТРОЙСТВО ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПО ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012153043

Приоритет изобретения 07 декабря 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 сентября 2014 г.

Срок действия патента истекает 07 декабря 2032 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ТОКОВ ТПЧФ-1

Во второй главе диссертации «Теоретические исследования трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1», пункте 2.2.4 «Решение уравнений для ТПЧФ-1», получены выражения для комплексов токов I'_A (2.33), I'_B (2.34), I'_C (2.35), определенные через комплексы сопротивлений \underline{Z}_H , \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 . Заменяем в выражениях комплексных токов (2.33) – (2.35) сопротивления нагрузки \underline{Z}_H и конденсаторных батарей \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 в алгебраической форме:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_H &= R_H + jx_H; \\ \underline{Z}_1 &= -jx_1; \\ \underline{Z}_2 &= -jx_2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б. 1})$$

$$\begin{aligned} I'_A &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} + \frac{1-\underline{a}^2}{\underline{Z}_1} + \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] = \\ &= U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + (1-\underline{a}^2)3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_2 + (1-\underline{a})3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1}{3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1\underline{Z}_2} \right]. \end{aligned} \quad (\text{Б. 2})$$

Числитель I'_A :

$$\begin{aligned} &4\underline{a}^2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_2 - \underline{a}^2 3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_2 + 3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1 - \underline{a} 3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1 = \\ &= 4\underline{a}^2(-jx_1)(-jx_2) + 3n^2(-jx_2)(R_H + jx_H) - \underline{a}^2 3n^2(-jx_2)(R_H + jx_H) + \\ &\quad + 3n^2(-jx_1)(R_H + jx_H) - \underline{a}^2 3n^2(-jx_1)(R_H + jx_H) = \\ &= -4\underline{a}^2 x_1 x_2 - j3n^2 x_2 R_H + +3n^2 x_2 x_H - j3\underline{a}^2 n^2 x_2 R_H - 3\underline{a}^2 n^2 x_1 R_H + \\ &\quad + 3n^2 x_1 x_H + j3n^2 \underline{a} x_1 R_H - 3n^2 \underline{a} x_1 x_H = \\ &= -4\underline{a}^2 x_1 x_2 + j3n^2 x_2 R_H (\underline{a}^2 - 1) + 3n^2 x_2 x_H (1 - \underline{a}^2) + \\ &\quad + j3n^2 x_1 R_H (\underline{a} - 1) + 3n^2 x_1 x_H (1 - \underline{a}) = \\ &= -4\underline{a}^2 x_1 x_2 + j3n^2 x_2 R_H \left(-\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + 3n^2 x_2 x_H \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \\ &\quad + j3n^2 x_1 R_H \left(-\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + 3n^2 x_1 x_H \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left[-8\underline{a}^2 x_1 x_2 - j9n^2 x_2 R_H + 3\sqrt{3}n^2 x_2 R_H + 9n^2 x_2 x_H + j3\sqrt{3}n^2 x_2 x_H - \right. \\ &\quad \left. -j9n^2 x_1 R_H - 3\sqrt{3}n^2 x_1 R_H + +9n^2 x_1 x_H - j3\sqrt{3}n^2 x_1 x_H \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[-8\underline{a}^2 x_1 x_2 + 3n^2 x_2 R_H (\sqrt{3} - j3) + 3n^2 x_1 x_H (3 + j\sqrt{3}) - \right. \\ &\quad \left. -3n^2 x_1 R_H (\sqrt{3} + j3) + 3n^2 x_1 x_H (3 - j\sqrt{3}) \right] = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ -8\underline{a}^2 x_1 x_2 + 3n^2 x_2 [R_H(\sqrt{3} - j3) + x_H(3 + j\sqrt{3})] \right. \\ \left. + 3n^2 x_1 [-R_H(\sqrt{3} + j3) + x_H(3 - j\sqrt{3})] \right\}; \quad (\text{Б. 3})$$

Запишем x_1, x_2 в соответствии с (2.63), (2.64):

$$x_1 = \frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{8R_H} = \frac{b}{8R_H}; \quad \left. \begin{aligned} b &= 3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2). \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б. 4})$$

$$x_2 = \frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{4(R_H + \sqrt{3}x_H)} = \frac{b}{4c}; \quad \left. \begin{aligned} c &= (R_H + \sqrt{3}x_H). \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б. 5})$$

$$\begin{aligned} I'_A \{ \} &= -8\underline{a}^2 \frac{b}{8R_H} \cdot \frac{b}{4c} + 3n^2 \frac{b}{4c} [R_H(\sqrt{3} - j3) + x_H(3 + j\sqrt{3})] + \\ &+ 3n^2 \frac{b}{8R_H} [-R_H(\sqrt{3} + j3) + x_H(3 - j\sqrt{3})] = \\ &= \frac{b}{4} \left\{ -\underline{a}^2 \frac{b}{R_H c} + \frac{3n^2}{c} [R_H(\sqrt{3} - j3) + x_H(3 + j\sqrt{3})] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3n^2}{2R_H} [-R_H(\sqrt{3} + j3) + x_H(3 - j\sqrt{3})] \right\} = \\ &= \frac{b}{4} \left\{ -\frac{\underline{a}^2 b}{R_H c} + \frac{3\sqrt{3}n^2 R_H}{c R_H} [R_H(1 - j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} + j)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\sqrt{3}n^2}{2R_H} [-R_H(1 + j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} - j)] \right\} = \\ &= \frac{b}{4R_H} \left\{ -\frac{\underline{a}^2 b}{c} + \frac{3\sqrt{3}n^2 R_H}{c} [R_H(1 - j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} + j)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\sqrt{3}n^2 c}{2c} [-R_H(1 + j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} - j)] \right\} = \\ &= \frac{b}{4R_H c} \left\{ -\underline{a}^2 b + 3\sqrt{3}n^2 R_H [R_H(1 - j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} + j)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3\sqrt{3}n^2 c}{2} [-R_H(1 + j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} - j)] \right\}; \quad (\text{Б. 6}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\underline{a}^2 b &= -\underline{a}^2 3\sqrt{3}n^2 (R_H^2 + x_H^2) = \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) 3\sqrt{3}n^2 (R_H^2 + x_H^2) = \\ &= \frac{3}{2} \sqrt{3}n^2 + j \frac{9}{2} n^2 (R_H^2 + x_H^2) = \frac{3}{2} \sqrt{3}n^2 (1 + j\sqrt{3}) (R_H^2 + x_H^2); \quad (\text{Б. 7}) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} \{ \} = 3\sqrt{3}n^2 (1 + j\sqrt{3}) (R_H^2 + x_H^2) + 6\sqrt{3}n^2 R_H [R_H(1 - j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} + j)] +$$

$$\begin{aligned}
& +3\sqrt{3}n^2(R_H + \sqrt{3}x_H)[-R_H(1 + j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} - j)] = \\
& = \frac{3\sqrt{3}n^2}{2} \left\{ (1 + j\sqrt{3})(R_H^2 + x_H^2) + 2R_H[R_H(1 - j\sqrt{3}) + x_H(\sqrt{3} + j)] + \right. \\
& \quad \left. + (R_H + \sqrt{3}x_H)[-R_H - j\sqrt{3}R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H] \right\}; \tag{Б.8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \{R_H^2 + x_H^2 + j\sqrt{3}R_H^2 + j\sqrt{3}x_H^2 + 2R_H^2 - j2R_H^2 + 2\sqrt{3}R_Hx_H + j2R_Hx_H - \\
& - R_H^2 - j\sqrt{3}R_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H - \sqrt{3}R_Hx_H - j3R_Hx_H + 3x_H^2 - j\sqrt{3}x_H^2\} = \\
& = 2R_H^2 + 4x_H^2 + 2\sqrt{3}R_Hx_H - j2\sqrt{3}R_H^2 - j2R_Hx_H = \\
& = 2[R_H^2 + 2x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H - j\sqrt{3}R_H^2 - jR_Hx_H]; \tag{Б.9}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}'_A = \frac{U_\phi}{\underline{Z}_H \underline{Z}_1 \underline{Z}_2} \cdot \frac{\sqrt{3}b}{4R_H c} [R_H^2 + 2x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H - j\sqrt{3}R_H^2 - jR_Hx_H]; \tag{Б.10}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\sqrt{3}b}{\underline{Z}_H \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 4R_H c} = \frac{\sqrt{3}b}{4R_H c (R_H + jx_H)(-jx_1)(-jx_2)} = \\
& = -\frac{\sqrt{3}b}{4R_H c (R_H + jx_H)x_1x_2} = -\frac{\sqrt{3}b}{4R_H c (R_Hx_1x_2 + jx_Hx_1x_2)} = \\
& = -\frac{\sqrt{3}b}{4R_H c x_1x_2 (R_H + jx_H)} = -\frac{\sqrt{3}b}{4R_H c \frac{b}{8R_H} \cdot \frac{b}{4c} (R_H + jx_H)} = \\
& = -\frac{\sqrt{3}}{\frac{b}{8} (R_H + jx_H)} = -\frac{8\sqrt{3}}{b(R_H + jx_H)} = -\frac{8\sqrt{3}}{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)(R_H + jx_H)} = \\
& = -\frac{8}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)(R_H + jx_H)}; \tag{Б.11}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}'_A = -\frac{8U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)(R_H + jx_H)} [R_H^2 + 2x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H - jR_H(\sqrt{3}R_H - jx_H)]; \tag{Б.12}$$

$$\underline{I}'_B = U_\phi \left[-\frac{8\underline{a}}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1 - \underline{a}^2}{\underline{Z}_1} \right] = U_\phi \left[\frac{-8\underline{a}\underline{Z}_1 - (1 - \underline{a}^2)3n^2\underline{Z}_H}{3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_1} \right]. \tag{Б.13}$$

Числитель \underline{I}'_B :

$$\begin{aligned}
& -8\underline{a}\underline{Z}_1 - (1 - \underline{a}^2)3n^2\underline{Z}_H = \\
& = -\left[8\left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-jx_1) + \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)3n^2(R_H + jx_H) \right] = \\
& = -\frac{1}{2} [(-8 - j8\sqrt{3})(-jx_1) + 3n^2(3 + j\sqrt{3})(R_H + jx_H)] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{2} [j8x_1 - 8\sqrt{3}x_1 + 3n^2(3R_H + j3x_H + j\sqrt{3}R_H - \sqrt{3}x_H)] = \\
&= -\frac{1}{2} [x_1(j8 - 8\sqrt{3}) + 3n^2(3R_H - \sqrt{3}x_H + j3x_H + j\sqrt{3}R_H)] = \\
&= -\frac{1}{2} \left[8(j - \sqrt{3}) \cdot \frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{8R_H} + 3n^2(3R_H - \sqrt{3}x_H + j3x_H + j\sqrt{3}R_H) \right] = \\
&= -\frac{3n^2}{2} \left[\frac{(j - \sqrt{3})\sqrt{3}(R_H^2 + x_H^2)}{R_H} + \frac{3R_H^2 - \sqrt{3}R_Hx_H + j3R_Hx_H + j\sqrt{3}R_H^2}{R_H} \right] = \\
&= -\frac{3n^2}{2R_H} [j\sqrt{3}R_H^2 - 3x_H^2 + j\sqrt{3}x_H^2 - 3R_H^2 + 3R_H^2 - \sqrt{3}R_Hx_H + j3R_Hx_H + j\sqrt{3}R_H^2] = \\
&= -\frac{3\sqrt{3}n^2}{j2R_H} [j2R_H^2 + jx_H^2 + j\sqrt{3}R_Hx_H - \sqrt{3}x_H^2 - R_Hx_H]j = \\
&= -\frac{3\sqrt{3}n^2}{j2R_H} [-2R_H^2 - x_H^2 - \sqrt{3}R_Hx_H - j\sqrt{3}x_H^2 - jR_Hx_H] = \\
&= \frac{3\sqrt{3}n^2}{j2R_H} [2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H + j\sqrt{3}x_H^2 + jR_Hx_H]; \tag{Б. 14}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I'_B &= \frac{U_\phi 3\sqrt{3}n^2 [\]}{j2R_H 3n^2 (R_H + jx_H)(-jx_1)} = \frac{U_\phi \sqrt{3} [\]}{j2R_H (-jR_Hx_1 + x_Hx_1)} = \\
&= \frac{U_\phi \sqrt{3} [\]}{2x_1(R_H^2 + jR_Hx_H)} = \frac{U_\phi \sqrt{3} [\]}{2R_H(R_H + jx_H) \cdot \frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2 + x_H^2)}{8R_H}} = \\
&= \frac{4U_\phi [\]}{(R_H + jx_H)3n^2(R_H^2 + x_H^2)}; \tag{Б. 15}
\end{aligned}$$

$$I'_B = \frac{4U_\phi}{3n^2(R_H + jx_H)(R_H^2 + x_H^2)} [2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H + jx_H(\sqrt{3}x_H + R_H)]; \tag{Б. 16}$$

Умножение на сопряжённый комплекс:

$$(R_H + jx_H)(R_H - jx_H) = R_H^2 - jR_Hx_H + jR_Hx_H + x_H^2 = R_H^2 + x_H^2; \tag{Б. 17}$$

$$I'_B = \frac{4U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} (R_H - jx_H) [\]; \tag{Б. 18}$$

$$\begin{aligned}
(R_H - jx_H) [\] &= R_H [\] - j2x_H R_H^2 - jx_H^2 x_H - jx_H \sqrt{3}R_Hx_H + x_H^2 \sqrt{3}x_H + x_H^2 = \\
&= R_H [\] - jx_H (2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_Hx_H) + x_H^2 (\sqrt{3}x_H + R_H) = \\
&= 2R_H^3 + R_Hx_H^2 + \sqrt{3}R_H^2x_H + jR_Hx_H\sqrt{3}x_H + jx_H R_H^2 - \\
&\quad - j2R_H^2x_H - jx_H^3 - j\sqrt{3}R_Hx_H^2 + \sqrt{3}x_H^3 + R_Hx_H^2 = \\
&= 2R_H^3 + R_Hx_H^2 + \sqrt{3}R_H^2x_H + \sqrt{3}x_H^3 + R_Hx_H^2 +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +j(\sqrt{3}R_H x_H^2 + R_H^2 x_H - 2R_H^2 x_H - x_H^3 - \sqrt{3}R_H x_H^2) = \\
& = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + x_H^2(\sqrt{3}x_H + R_H) + \\
& + jx_H(\sqrt{3}R_H x_H + R_H^2 + 2R_H^2 - x_H^2 - \sqrt{3}R_H x_H) = \\
& = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + x_H^2(\sqrt{3}x_H + R_H) + jx_H(-R_H^2 - x_H^2) = \\
& = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + x_H^2(\sqrt{3}x_H + R_H) - jx_H(R_H^2 + x_H^2); \tag{Б.19}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I'_B = \frac{4U_\phi}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)} [R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + x_H^2(\sqrt{3}x_H + R_H) - \\
-jx_H(R_H^2 + x_H^2)]; \tag{Б.20}
\end{aligned}$$

$$(R_H - jx_H)[] = R_H[] - jx_H[]; \tag{Б.21}$$

$$R_H[] = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + jR_H x_H(\sqrt{3}x_H + R_H); \tag{Б.22}$$

$$-jx_H[] = -jx_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + \sqrt{3}x_H^3 + x_H^2 R_H; \tag{Б.23}$$

$$\begin{aligned}
(R_H - jx_H)[] & = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + j\sqrt{3}R_H x_H^2 + jR_H^2 x_H - \\
& - jx_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + \sqrt{3}x_H^3 + x_H^2 R_H = \\
& = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + \sqrt{3}x_H^3 + x_H^2 R_H + \\
& + jx_H(-2R_H^2 - x_H^2 - \sqrt{3}R_H x_H + \sqrt{3}R_H x_H + R_H^2) = \\
& = 2R_H^3 + R_H x_H^2 + \sqrt{3}R_H^2 x_H + \sqrt{3}x_H^3 + R_H x_H^2 - jx_H(R_H^2 + x_H^2) = \\
& = R_H(2R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) + x_H^2(\sqrt{3}x_H + R_H) - jx_H(R_H^2 + x_H^2). \tag{Б.24}
\end{aligned}$$

В выражении (А.12) умножим числитель и знаменатель на $(R_H - jx_H)$:

$$I'_A = -\frac{4U_\phi(R_H - jx_H)}{3n^2(R_H^2 + x_H^2)^2} []; \tag{Б.25}$$

$$\begin{aligned}
(R_H - jx_H)[R_H^2 + 2x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H - jR_H(\sqrt{3}R_H + jx_H)] & = \\
= R_H[] - jx_H[]; \tag{Б.26}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (R_H^3 + 2R_H x_H^2 + \sqrt{3}R_H^2 x_H - jR_H^2(\sqrt{3}R_H + jx_H) - \\
& - jx_H(R_H^2 + x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H) - R_H x_H(\sqrt{3}R_H + x_H)) = \\
& = R_H(R_H^2 + 2x_H^2 + \sqrt{3}R_H x_H - \sqrt{3}R_H x_H - x_H^2) - \\
& - j(\sqrt{3}R_H^3 + R_H^2 x_H + R_H^2 + 2x_H^3 + \sqrt{3}R_H x_H^2) = \\
& = R_H(R_H^2 + x_H^2) - j(\sqrt{3}R_H^3 + 2x_H^3 + 2R_H^2 x_H + \sqrt{3}R_H x_H^2) =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= R_H(R_H^2+x_H^2) - j2x_H(R_H^2+x_H^2) - j\sqrt{3}R_H(R_H^2+x_H^2) = \\
&= (R_H^2+x_H^2)[R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)]; \tag{Б. 27}
\end{aligned}$$

$$I'_A = -\frac{4U_\phi(R_H^2+x_H^2)[R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)]}{3n^2(R_H^2+x_H^2)^2}; \tag{Б. 28}$$

$$I'_A = -\frac{4U_\phi[R_H - j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)]}{3n^2(R_H^2+x_H^2)}; \tag{Б. 29}$$

$$\begin{aligned}
[\](A. 20) &= 2R_H^3 + 2R_Hx_H^2 + \sqrt{3}R_H^2x_H + \sqrt{3}x_H^3 + R_Hx_H^2 - jx_H(R_H^2+x_H^2) = \\
&= 2R_H(R_H^2+x_H^2) + \sqrt{3}x_H(R_H^2+x_H^2) - jx_H(R_H^2+x_H^2) = \\
&= (R_H^2+x_H^2)[2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H]; \tag{Б. 30}
\end{aligned}$$

$$I'_B = \frac{4U_\phi[2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H]}{3n^2(R_H^2+x_H^2)}; \tag{Б. 31}$$

$$I'_C = U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2}{3n^2\underline{Z}_H} - \frac{1-\underline{a}}{\underline{Z}_2} \right] = U_\phi \left[\frac{4\underline{a}^2\underline{Z}_2 - (1-\underline{a})3n^2\underline{Z}_H}{3n^2\underline{Z}_H\underline{Z}_2} \right]. \tag{Б. 32}$$

Числитель I'_C :

$$\begin{aligned}
&4\underline{a}^2\underline{Z}_2 - (1-\underline{a})3n^2\underline{Z}_H = \\
&= 4\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-jx_2) - \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)3n^2(R_H + jx_H) = \\
&= \frac{1}{2}[4(jx_2 - \sqrt{3}x_2) - 3n^2(3R_H + j3x_H - j\sqrt{3}R_H + \sqrt{3}x_H)] = \\
&= \frac{1}{2}\{4x_2(j - \sqrt{3}) - 3\sqrt{3}n^2[\sqrt{3}R_H + x_H - j(\sqrt{3}x_H - R_H)]\} = \\
&= \frac{1}{2}\left\{\frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2+x_H^2)}{R_H+\sqrt{3}x_H}(j - \sqrt{3}) - 3\sqrt{3}n^2[(\sqrt{3}R_H + x_H) + j(\sqrt{3}x_H - R_H)]\right\} = \\
&= \frac{1}{2}3\sqrt{3}n^2\left\{\frac{(R_H^2+x_H^2)(j-\sqrt{3})}{R_H+\sqrt{3}x_H} - [(\sqrt{3}R_H + x_H) + j(\sqrt{3}x_H - R_H)]\right\} = \\
&= \frac{\sqrt{3}n^2}{2(R_H+\sqrt{3}x_H)}\{[jR_H^2 - \sqrt{3}R_H^2 + jx_H^2 - \sqrt{3}x_H^2] + \\
&+ [(-\sqrt{3}R_H - x_H)(R_H + \sqrt{3}x_H) - j(\sqrt{3}x_H - R_H)(R_H + \sqrt{3}x_H)]\}; \tag{Б. 33} \\
\{ \} &= -\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) + j(R_H^2+x_H^2) + [-\sqrt{3}R_H^2 - 3R_Hx_H - R_Hx_H - \sqrt{3}x_H^2] - \\
&- j[\sqrt{3}R_Hx_H + 3x_H^2 - R_H^2 - \sqrt{3}R_Hx_H] = \\
&= -\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) + j(R_H^2+x_H^2) - [\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) + 4R_Hx_H] - j[(3x_H^2 - R_H^2)] = \\
&= -2\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) - 4R_Hx_H + j[R_H^2+x_H^2 - 3x_H^2 - R_H^2] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -2\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) - 4R_Hx_H + j[2R_H^2 - 2x_H^2] = \\
&= 2[-\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) - 2R_Hx_H + j(R_H^2 - x_H^2)]; \tag{Б.34}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{I}'_C &= \frac{3\sqrt{3}n^2U_\phi}{2(R_H+\sqrt{3}x_H)} \frac{2[-\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)-2R_Hx_H+j(R_H^2-x_H^2)]}{3n^2Z_HZ_2} = \frac{j\sqrt{3}[-\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)-2R_Hx_H+j(R_H^2-x_H^2)]}{(R_H+\sqrt{3}x_H)Z_H(-jx_2)j} = \\
&= \frac{\sqrt{3}[-j\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)-j2R_Hx_H-(R_H^2-x_H^2)]}{(R_H+\sqrt{3}x_H)(R_H-jx_H)\frac{3\sqrt{3}n^2(R_H^2+x_H^2)}{4(R_H+\sqrt{3}x_H)}} = \frac{4[-j\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)-j2R_Hx_H-(R_H^2-x_H^2)](R_H-jx_H)}{3n^2(R_H^2+x_H^2)(R_H+jx_H)(R_H-jx_H)} = \\
&= \frac{4[-j\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)-j2R_Hx_H-(R_H^2-x_H^2)](R_H-jx_H)}{3n^2(R_H^2+x_H^2)}; \tag{Б.35}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[-j\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)-j2R_Hx_H-(R_H^2-x_H^2)](R_H-jx_H) &= -j\sqrt{3}R_H(R_H^2+x_H^2) - j2R_H^2x_H - R_H(R_H^2 - x_H^2) - \\
&\quad -\sqrt{3}(R_H^2+x_H^2) - 2R_Hx_H^2 + j(R_H^2 - x_H^2)x_H = \\
&= -[R_H(R_H^2-x_H^2) + \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)x_H + 2R_Hx_H^2] + \\
&\quad + j[(R_H^2 - x_H^2)x_H - \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)R_H - 2R_H^2x_H] = \\
&= -[R_H^3 - R_Hx_H^2 + 2R_Hx_H^2 + \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)x_H] + \\
&\quad + j[R_H^2x_H - x_H^3 - 2R_H^2x_H - \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)x_H] = \\
&= -[R_H^3 + R_Hx_H^2 + \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)x_H] + j[-R_H^2x_H - x_H^3 - \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)x_H] = \\
&= -[R_H(R_H^2+x_H^2) + \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)x_H] - j[x_H(R_H^2+x_H^2) + \sqrt{3}(R_H^2+x_H^2)R_H] = \\
&= -[(R_H^2+x_H^2) + (R_H + \sqrt{3}x_H)] - j[(R_H^2+x_H^2) + (x_H + \sqrt{3}R_H)] = \\
&= -(R_H^2+x_H^2)[(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)]; \tag{Б.36}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}'_C = -\frac{4U_\phi[(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)](R_H^2+x_H^2)}{3n^2(R_H^2+x_H^2)^2}; \tag{Б.37}$$

$$\underline{I}'_C = -\frac{4U_\phi[(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)]}{3n^2(R_H^2+x_H^2)}. \tag{Б.38}$$

Проверка $\underline{I}'_A + \underline{I}'_B + \underline{I}'_C = 0$,

$$\begin{aligned}
&\frac{4U_\phi}{3n^2(R_H^2+x_H^2)}[-R_H + j(\sqrt{3}R_H + 2x_H)] + \\
&+ [2R_H + \sqrt{3}x_H - jx_H] - [(R_H + \sqrt{3}x_H) + j(x_H + \sqrt{3}R_H)] = 0; \tag{Б.39}
\end{aligned}$$

В.ч.

$$-R_H + 2R_H + \sqrt{3}x_H - R_H - \sqrt{3}x_H = 0; \tag{Б.40}$$

М.ч.

$$\sqrt{3}R_H + 2x_H - x_H - x_H - \sqrt{3}R_H = 0. \quad (\text{Б. 41})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ ТОКОВ ТПЧФ-2

Решение системы уравнений (B.1) матричным методом.

$$\left. \begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= 0, \\ \left(1 + \frac{Z}{Z_1} + \frac{2Z}{Z_2}\right) I_a - \frac{Z}{Z_1} I_b - \left(1 + \frac{2Z}{Z_2}\right) I_c &= 0, \\ -n I_a Z + n I_b Z - n I_c Z &= \underline{U}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{B. 1})$$

$$[\underline{X}] \cdot [\underline{Y}] = [\underline{D}]. \quad (\text{B. 2})$$

Матрица системы уравнений:

$$[\underline{X}] = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 + \frac{Z}{Z_1} + \frac{2Z}{Z_2} & -\frac{Z}{Z_1} & -\left(1 + \frac{2Z}{Z_2}\right) \\ -n Z & n Z & -n Z \end{array} \right\|; \quad (\text{B. 3})$$

Искомый вектор тока:

$$[\underline{Y}] = \left\| \begin{array}{c} I_a \\ I_b \\ I_c \end{array} \right\|; \quad (\text{B. 4})$$

Задающий вектор:

$$[\underline{D}] = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \underline{U} \end{array} \right\|; \quad (\text{B. 5})$$

Определитель системы уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta &= \left| \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ \left(1 + \frac{Z}{Z_1} + \frac{2Z}{Z_2}\right) & -\frac{Z}{Z_1} & -\left(1 + \frac{2Z}{Z_2}\right) \\ -n Z & n Z & -n Z \end{array} \right| = \frac{n Z^2}{Z_1} + n Z \left(1 + \frac{2Z}{Z_2}\right) + \\ &+ n Z \left(1 + \frac{Z}{Z_1} + \frac{2Z}{Z_2}\right) - \frac{n Z^2}{Z_1} + n Z \left(1 + \frac{2Z}{Z_2}\right) + n Z \left(1 + \frac{Z}{Z_1} + \frac{2Z}{Z_2}\right) = \\ &= 2n Z \left(1 + \frac{2Z}{Z_2}\right) + 2n Z \left(1 + \frac{Z}{Z_1} + \frac{2Z}{Z_2}\right) = 2n Z + \frac{4n Z^2}{Z_2} + 2n Z + \frac{2n Z^2}{Z_1} + \frac{4n Z^2}{Z_2} = \\ &= 4n Z + \frac{8n Z^2}{Z_2} + \frac{2n Z^2}{Z_1} = \frac{4n Z Z_1 Z_2 + 8n Z^2 Z_1 + 2n Z^2 Z_2}{Z_1 Z_2}; \end{aligned} \quad (\text{B. 6})$$

$$\Delta = \frac{2n}{Z_1 Z_2} (2Z Z_1 Z_2 + 4Z^2 Z_1 + Z^2 Z_2) = 2n Z \left[2 + \frac{4Z}{Z_2} + \frac{Z}{Z_1} \right]; \quad (\text{B. 7})$$

Алгебраические дополнения $\underline{\Delta}_1, \underline{\Delta}_2, \underline{\Delta}_3$:

$$\begin{aligned} \underline{\Delta}_1 &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & -\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} & -\left(1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) \\ \underline{U} & n\underline{Z} & -n\underline{Z} \end{vmatrix} = -\underline{U}\left(1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) + \underline{U}\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} = \underline{U}\left[\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} - 1 - \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right] = \\ &= \underline{U}\left[\frac{\underline{Z}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\right]; \end{aligned} \quad (\text{B. 8})$$

$$\begin{aligned} \underline{\Delta}_2 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \left(1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) & 0 & -\left(1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) \\ -n\underline{Z} & \underline{U} & -n\underline{Z} \end{vmatrix} = \underline{U}\left(1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) + \underline{U}\left(1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) = \\ &= \underline{U}\left[2 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{4\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right] = \underline{U}\left[\frac{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\right]; \end{aligned} \quad (\text{B. 9})$$

$$\begin{aligned} \underline{\Delta}_3 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \left(1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) & -\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} & 0 \\ -n\underline{Z} & n\underline{Z} & \underline{U} \end{vmatrix} = -\underline{U}\frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} - \underline{U}\left(1 + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right) = \\ &= -\underline{U}\left[1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_1} + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_2}\right] = -\underline{U}\left[\frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\right]. \end{aligned} \quad (\text{B. 10})$$

Токи трёхфазной симметричной нагрузки:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{\underline{\Delta}_1}{\underline{\Delta}} = \frac{\underline{U}\underline{Z}_1\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2} \cdot \frac{\underline{Z}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{2n(2\underline{Z}\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}^2\underline{Z}_1 + \underline{Z}^2\underline{Z}_2)} = \\ &= \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{\underline{Z}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_1\underline{Z}_2 - 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{A}; \end{aligned} \quad (\text{B. 11})$$

где $A = 2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1 + \underline{Z}\underline{Z}_2$.

$$I_b = \frac{\underline{\Delta}_2}{\underline{\Delta}} = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1}{A}; \quad (\text{B. 12})$$

$$I_c = \frac{\underline{\Delta}_3}{\underline{\Delta}} = -\frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_1}{A}. \quad (\text{B. 13})$$

Определение токов трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2

В выражениях (B.10) – (B.13) комплексные токи трёхфазной симметричной нагрузки выражены через комплексные сопротивления нагрузки \underline{Z} и симметриру-

ющих элементов \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 . Выразим эти токи через модули сопротивлений R , x и x_1 , x_2 :

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z} &= R + jx; \\ \underline{Z}_1 &= -jx_1; \\ \underline{Z}_2 &= -jx_2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{B. 14})$$

Комплекс тока \underline{I}_a (B.11):

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{\underline{G}}{\underline{A}}; \quad (\text{B. 15})$$

$$\begin{aligned} \underline{G} &= \underline{Z} \underline{Z}_2 - \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - 2\underline{Z} \underline{Z}_1 = \\ &= (R + jx)(-jx_2) - (-jx_1)(-jx_2) - 2(R + jx)(-jx_1) = \\ &= -jRx_2 + xx_2 + x_1x_2 + j2Rx_1 - 2xx_1 = \\ &= (xx_2 + x_1x_2 - 2xx_1) + j(Rx_1 - Rx_2); \end{aligned} \quad (\text{B. 16})$$

$$\begin{aligned} \underline{A} &= 2(-jx_1)(-jx_2) + 4(R + jx)(-jx_1) + (R + jx)(-jx_2) = \\ &= -2x_1x_2 - j4Rx_1 + 4xx_1 - jRx_2 + xx_2 = \\ &= (xx_2 - 2x_1x_2 + 4xx_1) - j(4Rx_1 + Rx_2); \end{aligned} \quad (\text{B. 17})$$

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{(xx_2 + x_1x_2 - 2xx_1) + j(Rx_1 - Rx_2)}{(xx_2 - 2x_1x_2 + 4xx_1) - j(4Rx_1 + Rx_2)}. \quad (\text{B. 18})$$

Вещественная часть числителя:

$$\begin{aligned} &2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{x}{\sqrt{3}x - R} + \frac{\sqrt{3}(R^2 + x^2)}{2R(\sqrt{3}x - R)} - \frac{x}{2R} \right] = \\ &= 2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{2Rx + \sqrt{3}R^2 + \sqrt{3}x^2 - \sqrt{3}x^2 + Rx}{2R(\sqrt{3}x - R)} \right] = \\ &= 2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{3Rx + \sqrt{3}R^2}{2R(\sqrt{3}x - R)} \right] = \sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{\sqrt{3}(\sqrt{3}x + R)}{\sqrt{3}x - R} \right] = \\ &= \frac{3(R^2 + x^2)(\sqrt{3}x + R)}{\sqrt{3}x - R}. \end{aligned} \quad (\text{B. 19})$$

Мнимая часть числителя:

$$2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{1}{2} - \frac{R}{\sqrt{3}x - R} \right] = 2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{\sqrt{3}x - R - R}{2\sqrt{3}x - R} \right] =$$

$$= \sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{\sqrt{3}x - 3R}{(\sqrt{3}x - R)} \right] = \frac{3(R^2 + x^2)(x - \sqrt{3}R)}{\sqrt{3}x - R}. \quad (\text{B. 20})$$

Вещественная часть знаменателя:

$$\begin{aligned} & 2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{x}{\sqrt{3}x - R} - \frac{\sqrt{3}(R^2 + x^2)}{R(\sqrt{3}x - R)} + \frac{x}{R} \right] = \\ & = 2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{Rx - \sqrt{3}R^2 - \sqrt{3}x^2 + \sqrt{3}x^2 - Rx}{R(\sqrt{3}x - R)} \right] = -\frac{6R(R^2 + x^2)}{\sqrt{3}x - R}. \end{aligned} \quad (\text{B. 21})$$

Мнимая часть знаменателя:

$$\begin{aligned} & -2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{2R}{2R} + \frac{R}{\sqrt{3}x - R} \right] = \\ & = -2\sqrt{3}(R^2 + x^2) \left[\frac{\sqrt{3}x - R + R}{\sqrt{3}x - R} \right] = -\frac{6x(R^2 + x^2)}{\sqrt{3}x - R}. \end{aligned} \quad (\text{B. 22})$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{\frac{3(R^2 + x^2)}{\sqrt{3}x - R} [(\sqrt{3}x + R) + j(x - \sqrt{3}R)]}{-\frac{6R(R^2 + x^2)}{\sqrt{3}x - R} [R + jx]} = \\ & = -\frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{[(\sqrt{3}x + R) + j(x - \sqrt{3}R)]}{2(R + jx)}. \end{aligned} \quad (\text{B. 23})$$

Числитель:

$$\begin{aligned} & (\sqrt{3}Z \sin \varphi + Z \cos \varphi) + j(Z \sin \varphi - \sqrt{3}Z \cos \varphi) = \\ & = Z(\sqrt{3} \sin \varphi + \cos \varphi) + j(\sin \varphi - \sqrt{3} \cos \varphi) = \\ & = 2Z \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi + \frac{1}{2} \cos \varphi \right) - j \left(-\frac{1}{2} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right) = \\ & = 2Z[\sin(30^\circ + \varphi) - j\cos(30^\circ + \varphi)] = \frac{2Ze^{j(30^\circ + \varphi)}}{e^{j90^\circ}} = \\ & = 2Ze^{j(30^\circ - 90^\circ + \varphi)} = 2Ze^{j(\varphi - 60^\circ)}; \end{aligned} \quad (\text{B. 24})$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= -\frac{\underline{U} 2Ze^{j(\varphi - 60^\circ)}}{2n\underline{Z}e^{j\varphi} \cdot 2\underline{Z}e^{j\varphi}} = -\frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} e^{-j(\varphi - 60^\circ)} = \\ & = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} e^{j180^\circ} e^{-j(\varphi - 60^\circ)} = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} e^{j(120^\circ - \varphi)}; \end{aligned} \quad (\text{B. 25})$$

$$\underline{I}_a = \frac{U}{2nZ} e^{j(-\varphi+120^\circ)} = \frac{U}{2nZ} e^{j(120^\circ-\varphi)}. \quad (\text{B. 26})$$

Комплекс тока \underline{I}_B (3.30):

Числитель:

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &\rightarrow 2\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}\underline{Z}_2 + 4\underline{Z}\underline{Z}_1 = \\ &= 2(-jx_1)(-jx_2) + (R+jx)(-jx_2) + 4(R+jx)(-jx_1) = \\ &= -2x_1x_2 - jRx_2 + xx_2 - j4Rx_1 + 4xx_1 = \\ &= (xx_2 + 4xx_1 - 2x_1x_2) - j(Rx_2 + 4Rx_1); \end{aligned} \quad (\text{B. 27})$$

Вещественная часть числителя:

$$\begin{aligned} &\frac{x2\sqrt{3}(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R} + \frac{4x\sqrt{3}(R^2+x^2)^2}{2R} - \frac{2\sqrt{3}(R^2+x^2)2\sqrt{3}}{2R(\sqrt{3}x-R)} = \\ &= 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{x}{\sqrt{3}x-R} + \frac{2x}{2R} - \frac{\sqrt{3}(R^2+x^2)}{R(\sqrt{3}x-R)} \right] = \\ &= 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{Rx + \sqrt{3}x^2 - Rx - \sqrt{3}R^2 - \sqrt{3}x^2}{R(\sqrt{3}x-R)} \right] = \frac{-6R(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R}; \end{aligned} \quad (\text{B. 28})$$

Мнимая часть числителя:

$$\begin{aligned} &\frac{R2\sqrt{3}(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R} + \frac{4R^2\sqrt{3}(R^2+x^2)}{2R} = 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{R}{\sqrt{3}x-R} + 1 \right] = \\ &= 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{\sqrt{3}x + R - R}{\sqrt{3}x-R} \right] = \frac{6x(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R}; \end{aligned} \quad (\text{B. 29})$$

$$\underline{I}_B = \frac{U}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{R+jx}{R+jx} = \frac{U}{2n\underline{Z}} = \frac{U}{2nZ} e^{-j\varphi}; \quad (\text{B. 30})$$

$$\underline{I}_B = \frac{U}{2nZ} e^{-j\varphi}. \quad (\text{B. 31})$$

Комплекс тока \underline{I}_c (B.14):

Числитель:

$$\begin{aligned} \underline{I}_c &\rightarrow -(\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_2 + 2\underline{Z}\underline{Z}_1) = \\ &= -[-jx_1(-jx_2) + 2(R+jx)(-jx_2) + 2(R+jx)(-jx_1)] = \\ &= -[-jx_1x_2 - j2Rx_2 + 2xx_2 - j2Rx_1 + 2xx_1] = \\ &= (x_1x_2 - 2xx_2 - 2xx_1) + j(2Rx_2 + 2Rx_1); \end{aligned} \quad (\text{B. 32})$$

Вещественная часть числителя:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\sqrt{3}(R^2+x^2)2\sqrt{3}}{2R(\sqrt{3}x-R)} - \frac{2x2\sqrt{3}(R^2+x^2)^2}{\sqrt{3}x-R} - \frac{2x\sqrt{3}(R^2+x^2)}{2R} = \\
 & = 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{\sqrt{3}(R^2+x^2)}{2R(\sqrt{3}x-R)} + \frac{2x}{\sqrt{3}x-R} - \frac{x}{2R} \right] = \\
 & = 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{\sqrt{3}R^2 + \sqrt{3}x^2 - 4Rx - \sqrt{3}x^2 + Rx}{2R(\sqrt{3}x-R)} \right] = \\
 & = 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \frac{\sqrt{3}R^2 - 3Rx}{2R(\sqrt{3}x-R)} = \\
 & = \frac{3(R^2+x^2)(R-\sqrt{3}x)}{\sqrt{3}x-R} = -3(R^2+x^2); \tag{B.33}
 \end{aligned}$$

Мнимая часть числителя:

$$\begin{aligned}
 & \frac{2R2\sqrt{3}(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R} + \frac{2R\sqrt{3}(R^2+x^2)}{2R} = \\
 & = 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{2R}{\sqrt{3}x-R} + \frac{R}{2R} \right] = \\
 & = 2\sqrt{3}(R^2+x^2) \left[\frac{4R + \sqrt{3}x - R}{2(\sqrt{3}x-R)} \right] = 3(R^2+x^2) \frac{x\sqrt{3}R}{\sqrt{3}x-R}; \tag{B.34}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_c & = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{\frac{3(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R} [(R-\sqrt{3}x) + j(x+\sqrt{3}R)]}{\frac{-6(R^2+x^2)}{\sqrt{3}x-R} (R+jx)} = \\
 & = -\frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} \cdot \frac{(R-\sqrt{3}x) + j(x+\sqrt{3}R)}{2(R+jx)}. \tag{B.35}
 \end{aligned}$$

Числитель:

$$\begin{aligned}
 & Z \cos \varphi - \sqrt{3}Z \sin \varphi + j(Z \sin \varphi + \sqrt{3}Z \cos \varphi) = \\
 & = 2Z \left[\left(\frac{1}{2} \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) + j \left(\frac{1}{2} \sin \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi \right) \right] = \\
 & = 2Z [\sin(30^\circ - \varphi) + j \cos(30^\circ - \varphi)] =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2Z}{j} [\cos(30^\circ - \varphi) - j \sin(30^\circ - \varphi)] = \\
&= -\frac{2Z}{e^{j90^\circ}} e^{-j(30^\circ - \varphi)} = -2\underline{Z} e^{-j(120^\circ - \varphi)}; \tag{B.36}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}e^{j\varphi}} \cdot \frac{2\underline{Z}e^{-j(120^\circ - \varphi)}}{2\underline{Z}e^{j\varphi}} = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} e^{-j(120^\circ + 2\varphi - \varphi)}; \tag{B.37}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}}{2n\underline{Z}} e^{-j(120^\circ + \varphi)}. \tag{B.38}$$

Токи симметрирующих элементов (конденсаторных батарей) ТПЧФ-2

Токи определяются по формулам (3.27) и (3.28).

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{I}_a - \underline{I}_b)\underline{Z}}{\underline{Z}_1}; \tag{B.39}$$

$$\begin{aligned}
\underline{I}_a - \underline{I}_b &= \frac{U}{2nZ} \frac{[-\sqrt{3}x - R - jx + j\sqrt{3}R - 2R - j2x]}{2(R + jx)} = \\
&= \frac{U}{2nZ} \left[\frac{(-3R - \sqrt{3}x) - j(3x - \sqrt{3}R)}{2Z} \right] = \\
&= \frac{\sqrt{3}U}{2nZ^2} [(-\sqrt{3}R - x) - j(\sqrt{3}x - R)]; \tag{B.40}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}_1 = -\frac{\sqrt{3}U}{2nZZ_1} [(\sqrt{3}R + x) + j(\sqrt{3}x + R)]; \tag{B.41}$$

$$\begin{aligned}
[] &= (\sqrt{3}Z \cos \varphi + Z \sin \varphi) + j(\sqrt{3}Z \sin \varphi - Z \cos \varphi) = \\
&= 2Z \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right) + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi \right) \right] = \\
&= 2Z [\cos \varphi (-30^\circ + \varphi) + j \sin(\varphi - 30^\circ)] = 2Z e^{j(\varphi - 30^\circ)}; \tag{B.42}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{I}_1 &= -\frac{\sqrt{3}U 2Z e^{j(\varphi - 30^\circ)}}{4nZ e^{j\varphi} x_1 e^{-j90^\circ}} = -\frac{\sqrt{3}U e^{j(\varphi - 30^\circ)} e^{-j\varphi} e^{j90^\circ}}{2nx_1} = \\
&= -\frac{\sqrt{3}U e^{j60^\circ}}{2nx_1}; \tag{B.43}
\end{aligned}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\sqrt{3}U}{2nx_1} e^{-j120^\circ}; \tag{B.44}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\sqrt{3}U \cos \varphi}{2n\sqrt{3}Z} e^{-j120^\circ} = \frac{U \cos \varphi}{nZ} e^{-j120^\circ}; \quad (\text{B. 45})$$

$$\underline{I}_2 = \frac{(\underline{I}_c - \underline{I}_a)Z}{Z_2}; \quad (\text{B. 46})$$

$$\underline{I}_c - \underline{I}_a = -\frac{U}{2nZ} \left[\frac{(R - \sqrt{3}x) + j(x + \sqrt{3}R)}{2(R + jx)} - \frac{(\sqrt{3}x + R) + j(x - \sqrt{3}R)}{2(R + jx)} \right]; \quad (\text{B. 47})$$

Числитель:

$$\begin{aligned} & (R - \sqrt{3}x - \sqrt{3}x - R) + j(x + \sqrt{3}R - x + \sqrt{3}R) = \\ & = -2\sqrt{3}x + j2\sqrt{3}R = 2\sqrt{3}(-x + jR); \end{aligned} \quad (\text{B. 48})$$

$$\underline{I}_c - \underline{I}_a = -\frac{U}{2nZ} \cdot \frac{2\sqrt{3}(-x + jR)}{2Z}; \quad (\text{B. 49})$$

$$\underline{I}_2 = -\frac{\sqrt{3}U}{2nZZ_2} \cdot (-x + jR); \quad (\text{B. 50})$$

$$\begin{aligned} & (-x + jR) = -Z \sin \varphi + jZ \cos \varphi = \\ & = -\frac{Z}{j} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = -\frac{Z}{e^{j90^\circ}} e^{j\varphi} = -Ze^{j(\varphi - 90^\circ)}; \end{aligned} \quad (\text{B. 51})$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\sqrt{3}U Z e^{j(\varphi - 90^\circ)}}{2nZ e^{j\varphi} x_2 e^{-j90^\circ}} = \frac{\sqrt{3}U}{2nx_2}; \quad (\text{B. 52})$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\sqrt{3}U}{2nx_2}; \quad (\text{B. 53})$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\sqrt{3}U \sin(\varphi - 30^\circ)}{2nx_2 \sqrt{3}Z} = \frac{U}{2nZ} \sin(\varphi - 30^\circ); \quad (\text{B. 54})$$

$$\underline{I}_2 = \frac{U \sin(\varphi - 30^\circ)}{2nZ}. \quad (\text{B. 55})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
ГРАФИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи, (таблица 4.15)

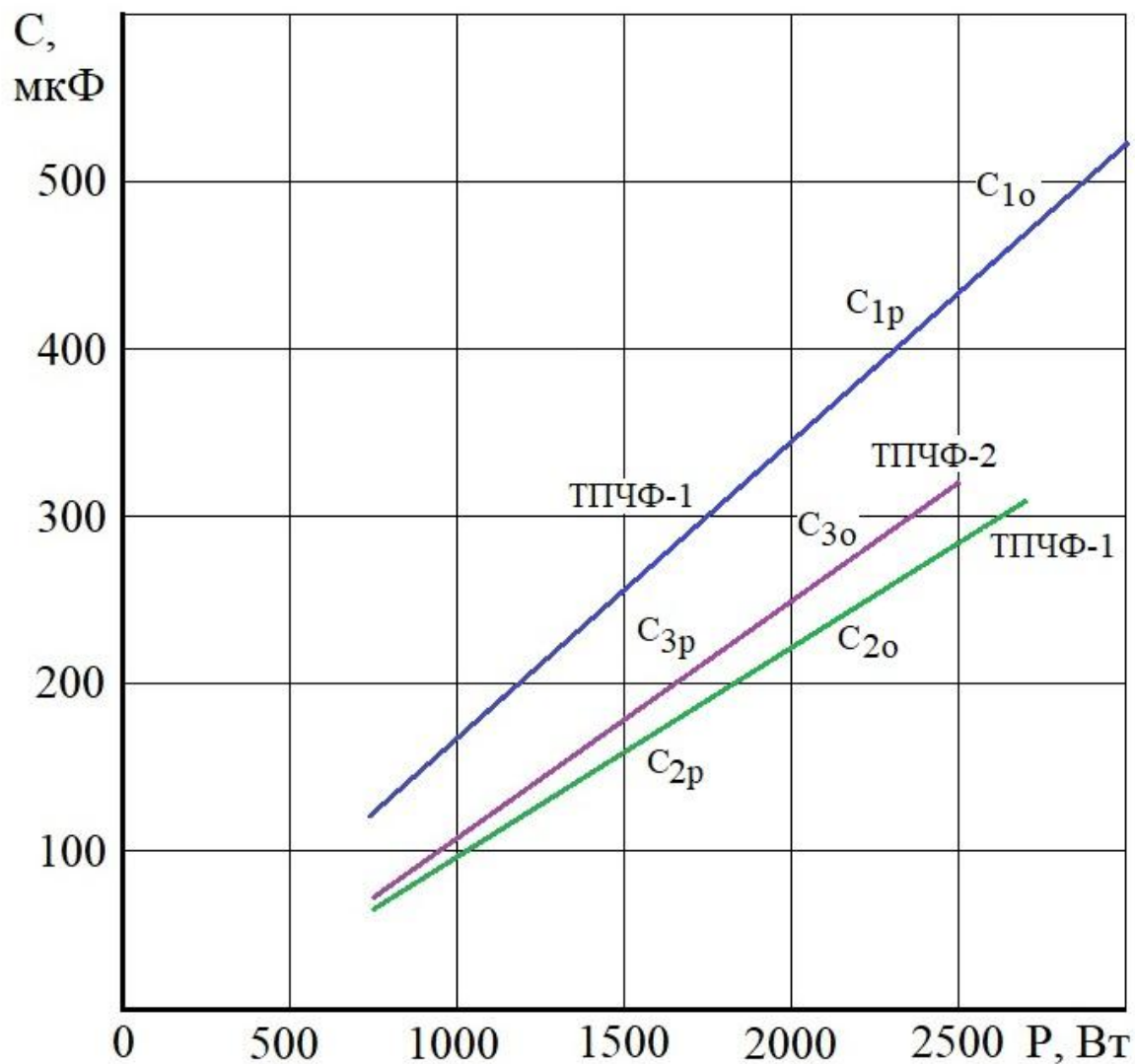


Рисунок Г.1 – Зависимости ёмкостей фазопреобразующих конденсаторных батарей ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 от активной мощности преобразователей: при активной нагрузке $\varphi = 0$ и коэффициенте трансформации ТПЧФ $n = 1,0$

Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи, (таблица 4.15)

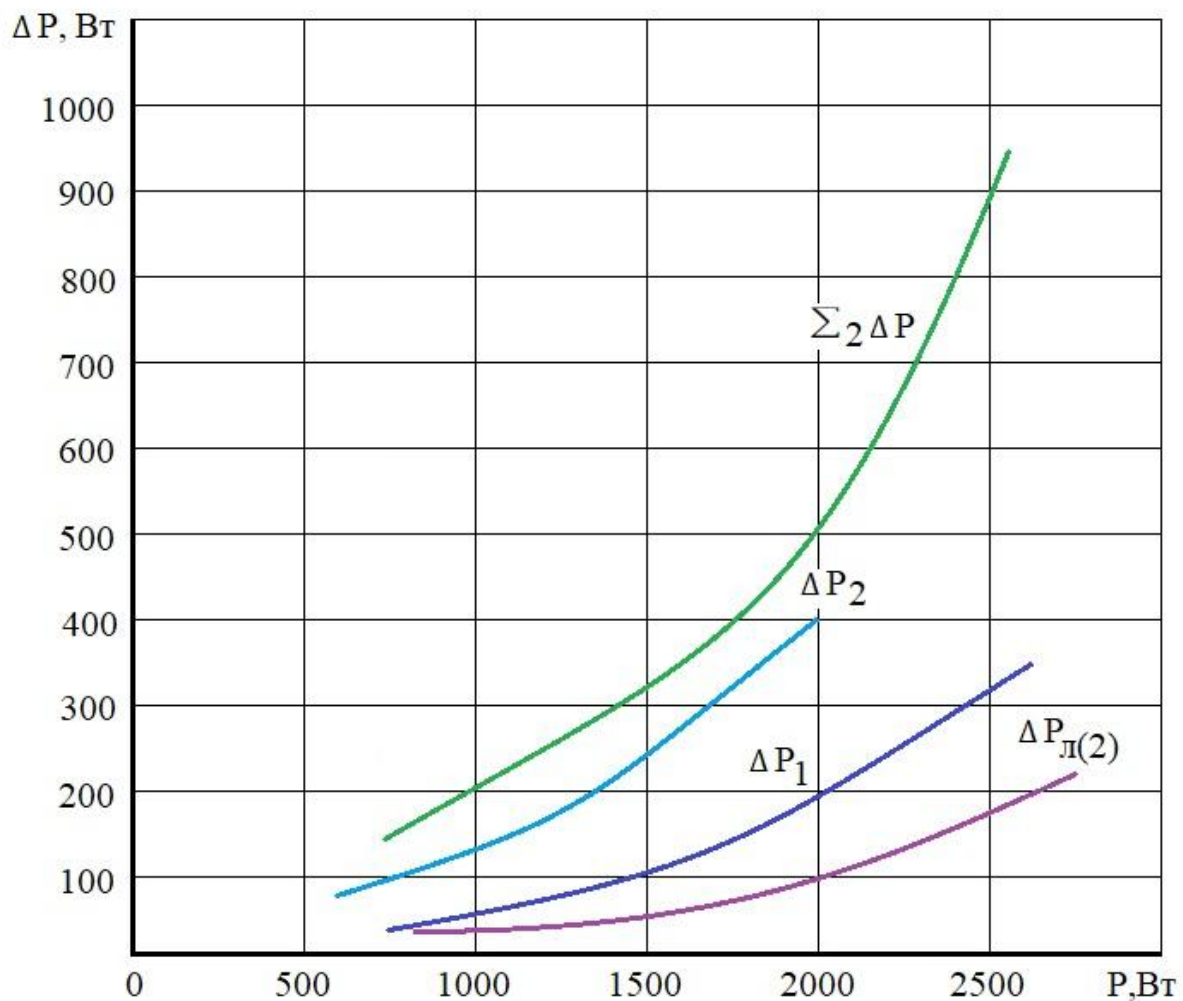


Рисунок Г.2 – Зависимости потерь мощности в ТПЧФ-1, ТПЧФ-2 и двухпроводной линии от активной мощности преобразователей:

при активной нагрузке $\varphi = 0$ и коэффициенте трансформации ТПЧФ $n = 1,0$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
РАСЧЁТ СМЕТНОЙ СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №1

коррект. Строительство 1 км ВЛ-10 кВ (СИП-3 1*70) 2 провода

(наименование работ и затрат)

Составлена Базисно-индексным методом

Основание
(проектная и (или) иная техническая документация)

Составлен(а) в текущем
(базисном) уровне цен

Сметная стоимость	2371,23	(333.58)	тыс. руб.	
в том числе:				Средства на оплату труда
строительных работ	2235,39	(328.08)	тыс. руб.	рабочих 161,7 8 тыс. руб.
монтажных работ	80,11	(3.36)	тыс. руб.	Нормативные затраты труда рабочих 817 чел. час.
оборудования	0	(0)	тыс. руб.	Нормативные затраты труда машинистов 102 чел. час.
прочих затрат	55,74	(2.14)	тыс. руб.	

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, учтенных за расценкой и перевозки), руб.			Индексы	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Строительные работы

1	ТЕР-33-04-016-02	Развозка конструкций и материалов опор ВЛ 0,38-10 кВ по трассе одноствоечных железобетонных опор (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	34	1	34						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=11,54 Кзпм=20,2										
	1	ОТ					6,81	1,15	266,22	20,2	5378,80	
	2	ЭМ					52,09	1,15	2036,60	11,54	23503,86	
	3	в т.ч. ОТм					11,77	1,15	460,36	20,2	9296,28	
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	0,44	1,15	17,204						
		ЗТм	чел.-ч	0,48	1,15	18,768						
		Итого по расценке						58,9		2302,82		28882,66
		ФОТ							726,58		14675,08	

	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			762,91		15408,83		
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			435,95		8805,05		
		Всего по позиции							3501,68		53096,54		
2	ТЕР-33-04-016-05	Развозка конструкций и материалов опор ВЛ 0,38-10 кВ по трассе материалов оснастки одноствоечных опор (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	15	1	15							
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.											
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.											
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=11,93 Кзпм=20,2											
	1	ОТ						3,87	1,4375	83,40	20,2	1685,55	
	2	ЭМ						12,79	1,4375	275,85	11,93	3290,10	
	3	в т.ч. ОТм						3,43	1,4375	73,95	20,2	1494,00	
	4	М							1				
		ЗТ	чел.-ч	0,25	1,4375	5,390625							
		ЗТм	чел.-ч	0,14	1,4375	3,01875							
		Итого по расценке							16,66		359,25		4975,65
		ФОТ									157,35		3179,55
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			165,22		3338,53		
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			94,41		1907,73		
		Всего по позиции							618,88		10221,91		
3	ТЕР-33-04-016-06	Развозка конструкций и материалов опор ВЛ 0,38-10 кВ по трассе материалов оснастки сложных опор (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от	опора	7	1	7							

		времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)										
2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.											
2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.											
Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=11,93 Кзпм=20,2											
	1	ОТ					4,64	1,4375	46,69	20,2	943,11	
	2	ЭМ					14,61	1,4375	147,00	11,93	1753,85	
	3	в т.ч. ОТм					3,92	1,4375	39,48	20,2	796,81	
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	0,3	1,4375	3,01875						
		ЗТм	чел.-ч	0,16	1,4375	1,61						
		Итого по расценке						19,25		193,69		2696,96
		ФОТ								86,17		1739,92
МДС81-33.2004 прил. 4		НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			90,48		1826,92	
ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1		СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			51,70		1043,95	
		Всего по позиции								335,87		5567,83
4	ТЕР-33-04-003-01	Установка железобетонных опор ВЛ 0,38; 6-10 кВ с траверсами без приставок одноствоечных (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	15	1	15						
2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.											
Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,03 Кзпм=20,2 Кмат=3,83											
	1	ОТ					63,8	1,15	1100,55	20,2	22231,05	
	2	ЭМ					155,25	1,15	2678,10	10,03	26860,95	
	3	в т.ч. ОТм					16,37	1,15	282,45	20,2	5704,20	
	4	М					41,67	1	625,05	3,83	2394,00	
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт									
	ССЦ01-110-9091	Штыри	шт									
	ССЦ01-110-9126	Металлические плакаты	шт	0,1	1	1,5						
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг									
	ССЦ01-201-9285	Траверсы стальные	т									
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т									

		ЗТ	чел.-ч	3,8	1,15	65,55					
		ЗТм	чел.-ч	0,78	1,15	13,455					
		Итого по расценке					260,72		4403,70		51486,00
		ФОТ							1383,00		27935,25
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		1452,15		29332,01	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		829,80		16761,15	
		Всего по позиции							6685,65		97579,16
5	ТЕР-33-04-003-02	Установка железобетонных опор ВЛ 0,38; 6- 10 кВ с траверсами без приставок одноствоечных с одним подкосом (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	2	1	2					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=10,03 Кзпм=20,2 Кмат=3,83									
	1	ОТ					132,64	1,15	305,08	20,2	6162,46
	2	ЭМ					363,85	1,15	836,86	10,03	8393,66
	3	в т.ч. ОТм					39,04	1,15	89,80	20,2	1813,80
	4	М					41,67	1	83,34	3,83	319,20
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт								
	ССЦ01-110-9091	Штыри	шт								
	ССЦ01-110-9126	Металлические плакаты	шт	0,1	1	0,2					
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-201-9285	Траверсы стальные	т								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	7,9	1,15	18,17					
		ЗТм	чел.-ч	1,86	1,15	4,278					
		Итого по расценке					538,16		1225,28		14875,32
		ФОТ							394,88		7976,26
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		414,62		8375,07	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		236,93		4785,76	
		Всего по позиции							1876,83		28036,15
6	ТЕР-33-04-003-03	Установка железобетонных опор ВЛ 0,38; 6- 10 кВ с траверсами без приставок	опора	5	1	5					

		одностоечных с двумя подкосами (в стесненных условиях населенных пунктов)									
2020С-101-5		МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
Инд_ЛО2014_05_2024		Козп=20,2 Кэм=10,03 Кзпм=20,2 Кмат=3,83									
	1	ОТ					203,33	1,15	1169,15	20,2	23616,80
	2	ЭМ					584,33	1,15	3359,90	10,03	33699,75
	3	в т.ч. ОТм					63,18	1,15	363,30	20,2	7338,35
	4	М					41,67	1	208,35	3,83	798,00
ССЦ01-110-9030		Изоляторы штыревые	шт								
ССЦ01-110-9091		Штыри	шт								
ССЦ01-110-9126		Металлические плакаты	шт	0,1	1	0,5					
ССЦ01-201-9261		Детали крепления стальные	кг								
ССЦ01-201-9266		Хомуты стальные	кг								
ССЦ01-201-9285		Траверы стальные	т								
ССЦ01-101-9341		Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	12,11	1,15	69,6325					
		ЗТм	чел.-ч	3,01	1,15	17,3075					
		Итого по расценке					829,33		4737,40		58114,55
		ФОТ							1532,45		30955,15
МДС81-33.2004 прил. 4		НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			1609,07		32502,91
ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1		СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			919,47		18573,09
		Всего по позиции							7265,94		109190,55
7	ТЕР-33-04-009-06	Подвеска проводов ВЛ 6-10 кВ в населенной местности сечением свыше 35 мм ² с помощью механизмов (при производстве работ в усложненных условиях: по просекам, кустарникам и неглубоким оврагам) (в стесненных условиях населенных пунктов)	км линии (3 провода) при	1,03	1	1,03					
2133-4312		ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.12 (Козп=1,1; Кэм=1,1) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: ПО ПРОСЕКАМ, КУСТАРНИКАМ И НЕГЛУБОКИМ ОВРАГАМ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,1 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
2020С-101-5		МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на									

		работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,56 Кзпм=20,2 Кмат=24,59									
	/3	Кпз=1/3									
	*2	Кпз=2									
	1	ОТ					1031,86	0,8433333	896,31	20,2	18105,42
	2	ЭМ					2461,48	0,8433333	2138,13	9,56	20440,47
	3	в т.ч. ОТм					456,1	0,8433333	396,18	20,2	8002,91
	4	М					361,21	0,6666667	248,03	24,59	6099,08
	ССЦ01-110-9009	Арматура линейная	т								
	ССЦ01-110-9032	Изоляторы линейные подвесные тарельчатые	т								
	ССЦ01-502-9079	Провода неизолированные	т								
		ЗТ	чел.-ч	57,23	0,8433333	49,711886					
		ЗТм	чел.-ч	22,38	0,8433333	19,440014					
		Итого по расценке					3854,55		3282,47		44644,97
		ФОТ							1292,49		26108,33
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			1357,11		27413,75
	ФАСнЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			775,49		15665,00
		Всего по позиции							5415,07		87723,72
8	ТЕР-33-04-030-01	Установка разрядников с помощью механизмов (в стесненных условиях населенных пунктов)	компл	14	1	14					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=8,66 Кзпм=20,2 Кмат=10,78									
	1	ОТ					72,03	1,15	1159,62	20,2	23425,64
	2	ЭМ					121,84	1,15	1961,68	8,66	16987,60
	3	в т.ч. ОТм					17,71	1,15	285,18	20,2	5759,60
	4	М					3,4	1	47,60	10,78	513,10
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт								
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	4,29	1,15	69,069					
		ЗТм	чел.-ч	0,97	1,15	15,617					
		Итого по расценке					197,27		3168,90		40926,34
		ФОТ							1444,80		29185,24

	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			1517,04		30644,50	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			866,88		17511,14	
		Всего по позиции							5552,82		89081,98	
9	ТЕР-33-04-030-03	Установка разъединителей с помощью механизмов (в стесненных условиях населенных пунктов)	компл	1	1	1						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=10,89 Кзпм=20,2 Кмат=11,83										
	1	ОТ						154,28	1,15	177,42	20,2	3583,92
	2	ЭМ						132,16	1,15	151,98	10,89	1655,11
	3	в т.ч. ОТм						16,19	1,15	18,62	20,2	376,09
	4	М						2,94	1	2,94	11,83	34,78
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт									
	ССЦ01-502-9079	Провода неизолированны е	т									
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг									
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг									
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т									
		ЗТ	чел.-ч	8,09	1,15	9,3035						
		ЗТм	чел.-ч	0,66	1,15	0,759						
		Итого по расценке						289,38		332,34		5273,81
		ФОТ								196,04		3960,01
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			205,84		4158,01	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			117,62		2376,01	
		Всего по позиции							655,8		11807,83	

	Всего										
	Прямые затраты								20005,85		251876,26
	оплата труда								5204,44		105132,75
	эксплуатация машин								13586,10		136585,35
	в т.ч. оплата труда машинистов								2009,32		40582,04
	материальные ресурсы								1215,31		10158,16
	в т.ч. материалы учтенные в расценках								1215,31		10158,16
	Итого ФОТ								7600,06		153517,81

	Итого накладные расходы	7574,44		153000,53
	Итого сметная прибыль	4328,25		87428,88
	Итого СМР	31908,54		492305,67
	Итого по разделу сметная стоимость	31908,54		492305,67

Электромонтажные работы

10	ТЕРм-08-02-472-09	Проводник заземляющий открыто по строительным основаниям из круглой стали диаметром 12 мм	100м	2,81	1	2,81						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,55 Кзпм=20,2 Кмат=8,49										
	1	ОТ					379,78	1	1067,18	20,2	21557,08	
	2	ЭМ					78,91	1	221,74	9,55	2117,59	
	3	в т.ч. ОТм					4,66	1	13,09	20,2	264,51	
	4	М					101	1	283,81	8,49	2409,55	
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	7,6	1	21,356						
		ЗТ	чел.-ч	21,3	1	59,853						
		ЗТм	чел.-ч	0,19	1	0,5339						
		Итого по расценке					559,69			1572,73		26084,22
		ФОТ								1080,27		21821,59
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) НР = 95% = 95%	%	95	1	95			1026,26		20730,51	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) СП = 65% = 65%	%	65	1	65			702,18		14184,03	
		Всего по позиции								3301,17		60998,76
11	ТЕРм-08-02-472-11	Перемычка заземляющая тросовая диаметром до 9,2 мм для строительных металлических конструкций	10штг	0,3	1	0,3						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=8,53 Кзпм=20,2 Кмат=12,61										
	1	ОТ					64,01	1	19,20	20,2	387,90	
	2	ЭМ					7,34	1	2,20	8,53	18,78	
	3	в т.ч. ОТм					0,25	1	0,08	20,2	1,52	
	4	М					6,79	1	2,04	12,61	25,69	
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	1,28	1	0,384						
		ЗТ	чел.-ч	3,59	1	1,077						
		ЗТм	чел.-ч	0,01	1	0,003						
		Итого по расценке					78,14			23,44		432,37
		ФОТ								19,28		389,42
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) НР = 95% = 95%	%	95	1	95			18,32		369,95	

ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) СП = 65% = 65%	%	65	1	65	12,53	253,12
Всего по позиции						54,29	1055,44

Всего			
Прямые затраты		1596,17	26516,59
оплата труда		1086,38	21944,98
эксплуатация машин		223,94	2136,37
в т.ч. оплата труда машинистов		13,17	266,03
материальные ресурсы		285,85	2435,24
в т.ч. материалы учтенные в расценках		285,85	2435,24
Итого ФОТ		1152,82	23287,14
Итого накладные расходы		1044,58	21100,46
Итого сметная прибыль		714,71	14437,15
Итого СМР		3355,46	62054,20
Итого по разделу сметная стоимость		3355,46	62054,20

Заземление

1 2	ТЕР-01-02-057-02	Разработка грунта вручную в траншеях глубиной до 2 м без креплений с откосами, группа грунтов 2 (сильно налипающего на инструменты грунта) (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 10 * 3 * 0,3 * 0,5	100м3 грунта	0,045	1	0,045					
	2101-3184	ОП П1.1.82; ПРИЛ1.12 ПЗ.184 ПРИМ. (Козп=1,15) ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКЕ ВРУЧНУЮ СИЛЬНО НАЛИПАЮЩЕГО НА ИНСТРУМЕНТЫ ГРУНТА 2 ГРУППЫ К РАСЦЕНКАМ ТАБЛ. 01-02-055 (2, 8), 01-02-056 (2, 8), 01-02-057 (2), 01-02-058 (2, 6), 01-02-061 (2), 01-02-063 (2) СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,15 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					2277,66	1,3225	135,55	20,2	2738,09
	2	ЭМ						1,15			
	3	в т.ч. ОТм						1,15			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	154	1,3225	9,164925					
		ЗТм	чел.-ч		1,15						
		Итого по расценке					2277,66		135,55		2738,09
		ФОТ							135,55		2738,09
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) НР = 80% = 80%	%	80	1	80			108,44		2190,47

	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) СП = 45% = 45%	%	45	1	45		61,00		1232,14		
		Всего по позиции							304,99		6160,7	
1 3	ТЕР-01-02-061-01	Засыпка вручную траншей, пазух котлованов и ям, группа грунтов 1 (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 10 * 3 * 0,3 * 0,5	100м3 грунта	0,045	1	0,045						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					1258,4 7	1,15	65,13	20,2	1315,54	
	2	ЭМ						1,15				
	3	в т.ч. ОТм						1,15				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	88,5	1,15	4,579875						
		ЗТм	чел.-ч		1,15							
		Итого по расценке						1258,4 7		65,13		1315,54
		ФОТ								65,13		1315,54
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) НР = 80% = 80%	%	80	1	80			52,10		1052,43	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) СП = 45% = 45%	%	45	1	45			29,31		591,99	
		Всего по позиции							146,54		2959,96	
1 4	ТЕР-33-04-015-01	Устройство заземления опор ВЛ и подстанций (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 10 * 3	10м шин заземлен ия	3	1	3						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,48 Кзпм=20,2 Кмат=11,91										
	1	ОТ					28,85	1,15	99,54	20,2	2010,57	
	2	ЭМ					19,2	1,15	66,24	9,48	627,96	
	3	в т.ч. ОТм						1,15		20,2		
	4	М					1,48	1	4,44	11,91	52,89	
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т									
		ЗТ	чел.-ч	1,8	1,15	6,21						
		ЗТм	чел.-ч		1,15							

		Итого по расценке					49,53		170,22		2691,42
		ФОТ							99,54		2010,57
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		104,52		2111,10	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		59,72		1206,34	
		Всего по позиции							334,46		6008,86
1 5	ТЕР-33-03-004-01	Забивка вертикальных заземлителей механизованна я на глубину до 5 м (в стесненных условиях населенных пунктов)	заземлит ель	10	1	10					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=6,27 Кзпм=20,2 Кмат=10,58									
	1	ОТ					12,98	1,15	149,30	20,2	3015,30
	2	ЭМ					119,43	1,15	1373,40	6,27	8611,50
	3	в т.ч. ОТм					11,14	1,15	128,10	20,2	2587,80
	4	М					30,92	1	3,70	10,58	39,10
		ЗТ	чел.-ч	0,81	1,15	9,315					
		ЗТм	чел.-ч	0,61	1,15	7,015					
		Итого по расценке					163,33		1526,40		11665,90
		ФОТ							277,40		5603,10
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		291,27		5883,26	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		166,44		3361,86	
		Всего по позиции							1984,11		20911,02

		Всего				
		Прямые затраты		1897,30		18410,9 5
		оплата труда		449,52		9079,50
		эксплуатация машин		1439,64		9239,46
		в т.ч. оплата труда машинистов		128,10		2587,80
		материальные ресурсы		8,14		91,99
		в т.ч. материалы учтенные в расценках		8,14		91,99
		Итого ФОТ		605,99		12240,4 0
		Итого накладные расходы		556,33		11237,2 6
		Итого сметная прибыль		316,47		6392,33
		Итого СМР		2770,10		36040,5 4
		Итого по разделу сметная стоимость		2770,10		36040,5 4

1 6	101-1889 ТССЦ_ЛО2014_0 5_2024	Сталь полосовая 40х4 мм, книпая Объем: 10 * 3 * 1,26 : 1000	т	0,0378	1	0,0378	63203, 86	1	208,82	11,44	2389,11
Всего по позиции									208,82		2389,11
1 7	101-2544 ТССЦ_ЛО2014_0 5_2024	Сталь угловая 63х63 мм Объем: 10 * 6 * 2 * 4,81 : 1000	т	0,5772	1	0,5772	59233, 11	1	2694,69	12,69	34189,35
Всего по позиции									2694,69		34189,35
1 8	101-3731 ТССЦ_ЛО2014_0 5_2024	Сталь круглая (катанка), диаметром 8 мм Объем: 90 * 0,666 : 1000	т	0,0599 4	1	0,0599	96268, 12	1	380,85	15,14	5766,46
Всего по позиции									380,85		5766,46

Всего											
Прямые затраты									3284,36		42344,9 2
материальные ресурсы									3284,36		42344,9 2
Итого СМР									3284,36		42344,9 2
Итого по разделу сметная стоимость									3284,36		42344,9 2

Материалы по ПРАЙС

1 9	Цена Поставщика	ОПОРЫ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ СВ 110-3,5АЩ	ШТ	34	1	34	12090, 83	1,02	105886,2 0	3,96	419310,1 0
Всего по позиции									105886,2		419310,1
2 0	Цена Поставщика	КРЕПЛЕНИЕ ПОДКОСА У 4	ШТ	12	1	12	1361,4 2	1,02	4208,04	3,96	16663,80
Всего по позиции									4208,04		16663,8
2 1	Цена Поставщика	ПРОВОД СИП-3 1Х70 ММ2 Объем: 3150 : 3 * 2	М	2100	1	2100	83,58	1,02	45213,00	3,96	179025,0 0
Всего по позиции									45213		179025
2 2	Цена Поставщика	СПИРАЛЬНАЯ ВЯЗКА СО 700Объем: 90 : 3 * 2	ШТ	60	1	60	112	1,02	1731,00	3,96	6854,40
Всего по позиции									1731		6854,4
2 3	Цена Поставщика	ЗАЖИМ ПРОКАЛЫВАЮ ЩИЙ SLW25.2 Объем: 42 : 3 * 2	ШТ	28	1	28	481,01	1,02	3469,20	3,96	13737,64
Всего по позиции									3469,2		13737,64
2 4	Цена Поставщика	ЗАЖИМ SO239 Объем: 36 : 3 * 2	ШТ	24	1	24	1016,4 2	1,02	6283,44	3,96	24882,00
Всего по позиции									6283,44		24882
2 5	Цена Поставщика	Разрядник длинно-искровой РДИП-10-IV- УХЛ1/001	ШТ	14	1	14	12850, 58	1,02	46340,00	3,96	183506,2 6
Всего по позиции									46340		183506,2 6
2 6	Цена Поставщика	ЗАЩИТНЫЙ КОЖУХ SP 16 (Кожух КЗ-02) Объем: 42 : 3 * 2	ШТ	28	1	28	126,91	1,02	915,32	3,96	3624,60
Всего по позиции									915,32		3624,6
2 7	Цена Поставщика	ИЗОЛЯТОР ШТЫРЕВОЙ SDI 37	ШТ	35	1	35	2830,5 8	1,02	25518,15	3,96	101051,6 5
Всего по позиции									25518,15		101051,6 5
2 8	Цена Поставщика	ИЗОЛЯТОРЫ НАТЯЖНОЙ SDI90.150	ШТ	32	1	32	2100,9 2	1,02	17316,80	3,96	68574,08
Всего по позиции									17316,8		68574,08

29	Цена Поставщика	КОЛПАЧОК КП-22 Объем: 72 : 3 * 2	ШТ	48	1	48	16,5	1,02	204,00	3,96	807,84	
		Всего по позиции								204		807,84
30	Цена Поставщика	УШКО У-1-7-16 Объем: 72 : 3 * 2	ШТ	48	1	48	232,83	1,02	2878,56	3,96	11399,52	
		Всего по позиции								2878,56		11399,52
31	Цена Поставщика	СЕРЬГА СР-6-17 (Серьга СР-7-16) Объем: 72 : 3 * 2	ШТ	48	1	48	115,17	1,02	1424,16	3,96	5638,56	
		Всего по позиции								1424,16		5638,56
32	Цена Поставщика	СКОБА СК-7 Объем: 72 : 3 * 2	ШТ	48	1	48	159,17	1,02	1968,00	3,96	7792,80	
		Всего по позиции								1968		7792,8
33	Цена Поставщика	ЗАЖИМ СТАЛЬНОЙ ПС-2-2	ШТ	37	1	37	98,42	1,02	937,95	3,96	3714,43	
		Всего по позиции								937,95		3714,43
34	Цена Поставщика	БАНДАЖНАЯ ЛЕНТА СОТ 37 (Лента KR-2)	ШТ	73	1	73	86	1,02	1616,95	3,96	6403,56	
		Всего по позиции								1616,95		6403,56
35	Цена Поставщика	СКРЕПА СОТ 36 (Скрепа В 200)	ШТ	73	1	73	24	1,02	451,14	3,96	1787,04	
		Всего по позиции								451,14		1787,04
36	Цена поставщика	КРОНШТЕЙН Ра4 Объем: 3 * 1	ШТ	3	1	3	359,13	1,02	277,50	3,96	1098,93	
		Всего по позиции								277,5		1098,93
37	Цена поставщика	КРОНШТЕЙН КМ2	ШТ	1	1	1	1245,96	1,02	320,93	3,96	1270,88	
		Всего по позиции								320,93		1270,88
38	Цена поставщика	СКОБА КМ3	ШТ	4	1	4	192,58	1,02	198,40	3,96	785,72	
		Всего по позиции								198,4		785,72
39	Цена поставщика	ХОМУТ Х7	ШТ	1	1	1	220,01	1,02	56,67	3,96	224,41	
		Всего по позиции								56,67		224,41
40	Цена поставщика	ХОМУТ Х8	ШТ	4	1	4	226,95	1,02	233,84	3,96	925,96	
		Всего по позиции								233,84		925,96
41	Цена поставщика	ПРОВОДНИК ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ ЗП 1	М	6	1	6	578,5	1,02	894,06	3,96	3540,42	
		Всего по позиции								894,06		3540,42
42	Цена поставщика	РЛКВ-2-10IV/400 УХЛ1 с ПР-05-7 с КМЧ и тягами	ШТ	1	1	1	56807,5	1,02	14632,23	3,96	57943,65	
		Всего по позиции								14632,23		57943,65
43	Цена поставщика	ЗАЖИМ АППАРАТНЫЙ А1А-70 (Зажим аппаратный А1А-70Т)	ШТ	4	1	4	126,42	1,02	130,24	3,96	515,80	
		Всего по позиции								130,24		515,8
44	Цена поставщика	СИПЗ-1*70 ОШИНОВКА	М	9	1	9	83,58	1,02	193,77	3,96	767,25	
		Всего по позиции								193,77		767,25
45	Цена Поставщика	Заземляющий проводник ЗП-6	М	2	1	2	510,57	1,02	263,02	3,96	1041,56	
		Всего по позиции								263,02		1041,56
46	Цена Поставщика	Оголовок ОГ-54	ШТ	15	1	15	1206	1,02	4659,60	3,96	18451,80	
		Всего по позиции								4659,6		18451,8
47	Цена Поставщика	Траверса ТМ-77	ШТ	7	1	7	642	1,02	1157,52	3,96	4583,88	
		Всего по позиции								1157,52		4583,88

		Всего									
		Прямые затраты							289379,69		114592,354
		материальные ресурсы							289379,69		114592,354
		Итого СМР							289379,69		114592,354
		Итого по разделу сметная стоимость							289379,69		114592,354

Погрузка разгрузка

48	СПГ-01-01-002-03	Разгрузка при автомобильных перевозках изделий из сборного железобетона, бетона, керамзитобетона массой до 3 т Объем: 34 * 1.1	т груза	37,4	1	37,4	15,76	1,15	678,06	20,2	13692,14
		Всего по позиции							678,06		13692,14
49	СПГ-01-01-002-45	Разгрузка при автомобильных перевозках прочих материалов, деталей (с использованием погрузчика)	т груза	2,74	1	2,74	19,59	1,15	61,73	20,2	1246,89
		Всего по позиции							61,73		1246,89

		Всего									
		Прямые затраты							739,79		14939,03
		оплата труда							221,98		4481,70
		эксплуатация машин							517,81		10457,33
		Итого ФОТ							221,98		4481,70
		Итого СМР							739,79		14939,03
		Итого по разделу сметная стоимость							739,79		14939,03

Пусконаладочные работы

50	ТЕРп-01-11-027-01	Измерение токов утечки или пробивного напряжения разрядника	измерение	14	1	14					
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					39,33	1	550,62	20,2	11122,58
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	1,62	1	22,68					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					39,33		550,62		11122,58
		ФОТ							550,62		11122,58
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочные работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65			357,90		7229,68
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочные работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40			220,25		4449,03
		Всего по позиции							1128,77		22801,29

5 1	ТЕРп-01-03-005-01	Разъединитель трехполюсный напряжением до 20 кВ	шт	1	1	1						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					125,01	1	125,01	20,2	2525,20	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	5,4	1	5,4						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					125,01		125,01		2525,20	
		ФОТ							125,01		2525,20	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочные работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65			81,26		1641,38	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочные работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40			50,00		1010,08	
		Всего по позиции							256,27		5176,66	
5 2	ТЕРп-01-11-024-02	Фазировка электрической линии или трансформатора с сетью напряжением свыше 1 кВ	фазировка	1	1	1						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					39,33	1	39,33	20,2	794,47	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	1,62	1	1,62						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					39,33		39,33		794,47	
		ФОТ							39,33		794,47	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочные работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65			25,56		516,41	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочные работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40			15,73		317,79	
		Всего по позиции							80,62		1628,67	
5 3	ТЕРп-01-11-010-01	Измерение сопротивления растеканию тока заземлителя	измерение	10	1	10						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					29,62	1	296,20	20,2	5983,20	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	1,22	1	12,2						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					29,62		296,20		5983,20	

		ФОТ						296,20		5983,20	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочны е работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65		192,53		3889,08	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочны е работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40		118,48		2393,28	
		Всего по позиции						607,21		12265,56	
5 4	ТЕРп-01-11-011- 01	Проверка наличия цепи между заземлителями и заземленными элементами	100точек	0,1	1	0,1					
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					314,6	1	31,46	20,2	
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	12,96	1	1,296					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке						314,6		31,46	635,49
		ФОТ							31,46		635,49
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочны е работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65		20,45		413,07	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочны е работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40		12,58		254,20	
		Всего по позиции							64,49		1302,76

		Всего				
		Прямые затраты			1042,62	21060,94
		оплата труда			1042,62	21060,94
		Итого ФОТ			1077,17	21759,11
		Итого накладные расходы			677,70	13689,62
		Итого сметная прибыль			417,04	8424,38
		Итого СМР			2137,36	43174,94
		Итого по разделу сметная стоимость			2137,36	43174,94

		Всего				
		Прямые затраты			317945,78	1521072,23
		оплата труда			8004,94	161699,87
		эксплуатация машин			15767,49	158418,51
		в т.ч. оплата труда машинистов			2150,59	43435,87
		материальные ресурсы			294173,35	1200953,85
		в т.ч. материалы учтенные в расценках			1509,30	12685,39
		в т.ч. неучтенные материалы			292664,05	1188268,46

	Итого ФОТ	10658,0 2		215286, 16
	Итого накладные расходы	9853,05		199027, 87
	Итого сметная прибыль	5776,47		116682, 74
	Итого СМР	333575, 30		183678 2,84
	Итого сметная стоимость	333575, 30		183678 2,84
МС РФ от 19.06.2020 №332/пр, п.50.	Временные здания и сооружения		2,5 %	45919,5 7
	Итого с ВЗиС			188270 2,41
МС РФ от 25.05.2021 №325/пр, п.85.	Зимнее удорожание		1,9 %	35771,3 5
	Итого с зимним удорожанием			191847 3,76
	Итого с оборудованием			191847 3,76
МС РФ от 04.08.2020 №421/пр	Непредвиденные работы и затраты		3 %	57554,2 1
	Итого без НДС			197602 7,97
НК РФ ч.2 Глава 21 от 05.08.2000 №117-ФЗ	НДС		20 %	395205, 60
	ИТОГО			237123 3,57

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №2

Строительство 1 км ВЛ-10 кВ (СИП-3 1*70)

(наименование работ и затрат)

Составлена Базисно-индексным методомОснование (проектная и (или) иная техническая документация)

Составлен(а) в текущем (базисном) уровне цен

Сметная стоимость	3707,14	(487.06)	тыс. руб.								
в том числе:											
Средства на оплату труда рабочих							270,25	13,38		тыс. руб.	
строительных работ	3516,69	(479.42)	тыс. руб.						1124	чел. час.	
монтажных работ	96,87	(4.06)	тыс. руб.						188	чел. час.	
оборудования	0	(0)	тыс. руб.								
прочих затрат	93,58	(3.59)	тыс. руб.								
Нормативные затраты труда рабочих											
Нормативные затраты труда машинистов											

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, учтенных за расценкой и перевозки), руб.			Индексы	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Строительные работы

1	ТЕР-33-04-016-02	Развозка конструкций и материалов опор ВЛ 0,38-10 кВ по трассе одноствоечных железобетонных опор (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	34	1	34					
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									

	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=11,54 Кзпм=20,2									
	1	ОТ					6,81	1,4375	332,86	20,2	6723,50
	2	ЭМ					52,09	1,4375	2545,92	11,54	29379,74
	3	в т.ч. ОТм					11,77	1,4375	575,28	20,2	11620,18
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	0,44	1,4375	21,505					
		ЗТм	чел.-ч	0,48	1,4375	23,46					
		Итого по расценке					58,9		2878,78		36103,24
		ФОТ							908,14		18343,68
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			953,55		19260,86
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			544,88		11006,21
		Всего по позиции							4377,21		66370,31
2	ТЕР-33-04-016-05	Развозка конструкций и материалов опор ВЛ 0,38-10 кВ по трассе материалов оснастки одностоечных опор (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	15	1	15					
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=11,93 Кзпм=20,2									
	1	ОТ					3,87	1,4375	83,40	20,2	1685,55
	2	ЭМ					12,79	1,4375	275,85	11,93	3290,10
	3	в т.ч. ОТм					3,43	1,4375	73,95	20,2	1494,00
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	0,25	1,4375	5,390625					
		ЗТм	чел.-ч	0,14	1,4375	3,01875					
		Итого по расценке					16,66		359,25		4975,65

		ФОТ						157,35		3179,55	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		165,22		3338,53	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		94,41		1907,73	
		Всего по позиции						618,88		10221,91	
3	ТЕР-33-04-016- 06	Развозка конструкций и материалов опор ВЛ 0,38-10 кВ по трассе материалов оснастки сложных опор (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	7	1	7					
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛОУ2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=11,93 Кзпм=20,2									
	1	ОТ					4,64	1,4375	46,69	20,2	943,11
	2	ЭМ					14,61	1,4375	147,00	11,93	1753,85
	3	в т.ч. ОТм					3,92	1,4375	39,48	20,2	796,81
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	0,3	1,4375	3,01875					
		ЗТм	чел.-ч	0,16	1,4375	1,61					
		Итого по расценке					19,25		193,69		2696,96
		ФОТ							86,17		1739,92
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		90,48		1826,92	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		51,70		1043,95	
		Всего по позиции						335,87		5567,83	

4	ТЕР-33-04-003-01	Установка железобетонных опор ВЛ 0,38; 6-10 кВ с траверсами без приставок одностоечных (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	15	1	15					
	4304-1	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.6 (Козп=1,25(бур.); Кэм=1,25(бур.)) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ: БУРЕНИИ КОТЛОВАНОВ ДЛЯ ОПОР ВЛ 0,38-10 КВ НА ГЛУБИНУ БОЛЕЕ 2-Х М К ЗАТРАТАМ НА БУРЕНИЕ СОГЛАСНО ПРИЛ 33.1 (С ПОСЛЕДУЮЩИМ УТОЧНЕНИЕМ НОРМ) ПО ТАБЛ. 33-04-001 (01), 33-04-003 (01) СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <S> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,03 Кзпм=20,2 Кмат=3,83									
	1	ОТ				63,8	1,796875	1719,60	20,2	34736,10	
	2	ЭМ				155,25	1,796875	4184,40	10,03	41970,30	
	3	в т.ч. ОТм				16,37	1,796875	441,15	20,2	8912,70	
	4	М				41,67	1	625,05	3,83	2394,00	
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт								
	ССЦ01-110-9091	Штыри	шт								
	ССЦ01-110-9126	Металлические плакаты	шт	0,1	1	1,5					
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-201-9285	Траверсы стальные	т								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	3,8	1,796875	102,421875					
		ЗТм	чел.-ч	0,78	1,796875	21,02343					
		Итого по расценке					260,72		6529,05		79100,40
		ФОТ						2160,75		43648,80	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		2268,79		45831,24	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		1296,45		26189,28	
		Всего по позиции							10094,29		151120,92

5	ТЕР-33-04-003-02	Установка железобетонных опор ВЛ 0,38; 6-10 кВ с траверсами без приставок одностоечных с одним подкосом (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	2	1	2					
	4304-1	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.6 (Козп=1,25(бур.); Кэм=1,25(бур.)) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ: БУРЕНИИ КОТЛОВАНОВ ДЛЯ ОПОР ВЛ 0,38-10 КВ НА ГЛУБИНУ БОЛЕЕ 2-Х М К ЗАТРАТАМ НА БУРЕНИЕ СОГЛАСНО ПРИЛ 33.1 (С ПОСЛЕДУЮЩИМ УТОЧНЕНИЕМ НОРМ) ПО ТАБЛ. 33-04-001 (01), 33-04-003 (01) СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,03 Кзпм=20,2 Кмат=3,83									
	1	ОТ					132,64	1,796875	476,68	20,2	9628,84
	2	ЭМ					363,85	1,796875	1307,58	10,03	13115,08
	3	в т.ч. ОТм					39,04	1,796875	140,30	20,2	2834,06
	4	М					41,67	1	83,34	3,83	319,20
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт								
	ССЦ01-110-9091	Штыри	шт								
	ССЦ01-110-9126	Металлические плакаты	шт	0,1	1	0,2					
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-201-9285	Траверы стальные	т								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	7,9	1,796875	28,390624					
		ЗТм	чел.-ч	1,86	1,796875	6,684374					
		Итого по расценке					538,16		1867,60		23063,12
		ФОТ							616,98		12462,90
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			647,83		13086,05
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			370,19		7477,74

		Всего по позиции							2885,62		43626,91
6	ТЕР-33-04-003-03	Установка железобетонных опор ВЛ 0,38; 6-10 кВ с траверсами без приставок одностоечных с двумя подкосами (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	5	1	5					
	4304-1	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.6 (Козп=1,25(бур.); Кэм=1,25(бур.)) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ: БУРЕНИИ КОТЛОВАНОВ ДЛЯ ОПОР ВЛ 0,38-10 КВ НА ГЛУБИНУ БОЛЕЕ 2-Х М К ЗАТРАТАМ НА БУРЕНИЕ СОГЛАСНО ПРИЛ 33.1 (С ПОСЛЕДУЮЩИМ УТОЧНЕНИЕМ НОРМ) ПО ТАБЛ. 33-04-001 (01), 33-04-003 (01) СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,03 Кзпм=20,2 Кмат=3,83									
	1	ОТ					203,33	1,796875	1826,80	20,2	36901,20
	2	ЭМ					584,33	1,796875	5249,85	10,03	52655,90
	3	в т.ч. ОТм					63,18	1,796875	567,65	20,2	11466,20
	4	М					41,67	1	208,35	3,83	798,00
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	шт								
	ССЦ01-110-9091	Штыри	шт								
	ССЦ01-110-9126	Металлические плакаты	шт	0,1	1	0,5					
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-201-9285	Траверсы стальные	т								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	12,11	1,796875	108,80078					
		ЗТм	чел.-ч	3,01	1,796875	27,04297					
		Итого по расценке					829,33		7285,00		90355,10
		ФОТ							2394,45		48367,40
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			2514,17		50785,77

	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			1436,67		29020,44	
		Всего по позиции							11235,84		170161,31	
7	ТЕР-33-04-009-06	Подвеска проводов ВЛ 6-10 кВ в населенной местности сечением свыше 35 мм ² с помощью механизмов (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (при производстве работ в усложненных условиях: по просекам, кустарникам и неглубоким оврагам) (в стесненных условиях населенных пунктов)	км линии (3 провода) при	1,03	1	1,03						
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.										
	2133-4312	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 ПЗ.12 (Козп=1,1; Кэм=1,1) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: ПО ПРОСЕКАМ, КУСТАРНИКАМ И НЕГЛУБОКИМ ОВРАГАМ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,1 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.										
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <S> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,56 Кзпм=20,2 Кмат=24,59										
	1	ОТ						1031,86	1,58125	1680,58	20,2	33947,67
	2	ЭМ						2461,48	1,58125	4008,98	9,56	38325,87
	3	в т.ч. ОТм						456,1	1,58125	742,85	20,2	15005,45
	4	М						361,21	1	372,05	24,59	9148,61
	ССЦ01-110-9009	Арматура линейная	т									
	ССЦ01-110-9032	Изоляторы линейные подвесные тарельчатые	т									
	ССЦ01-502-9079	Провода неизолированные	т									
		ЗТ	чел.-ч	57,23	1,58125	93,209785						
		ЗТм	чел.-ч	22,38	1,58125	36,450026						
		Итого по расценке						3854,55		6061,61		81422,15
		ФОТ								2423,43		48953,12

	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		2544,60		51400,78	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		1454,06		29371,87	
		Всего по позиции						10060,27		162194,8	
8	ТЕР-33-04-009- 14	При увеличении количества опор на 1 км ВЛ добавлять к расценке 33-04- 009-06 (при производстве работ в усложненных условиях: в распутицу (независимо от времени года), на участках, залитых водой) (при производстве работ в усложненных условиях: по просекам, кустарникам и неглубоким оврагам) (в стесненных условиях населенных пунктов)	опора	12	1	12					
	2133-4310	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.10 ПРИМ2 (Козп=1,25; Кэм=1,25) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: В РАСПУТИЦУ (НЕЗАВИСИМО ОТ ВРЕМЕНИ ГОДА), НА УЧАСТКАХ, ЗАЛИТЫХ ВОДОЙ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-012, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,25 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ДОЛЖНО БЫТЬ ПОДТВЕРЖДЕНО СООТВЕТСТВУЮЩИМИ АКТАМИ. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2133-4312	ОП П1.33.3, П1.33.7; ПРИЛ33.4 П3.12 (Козп=1,1; Кэм=1,1) ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАБОТ В УСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ: ПО ПРОСЕКАМ, КУСТАРНИКАМ И НЕГЛУБОКИМ ОВРАГАМ ПО ТАБЛ. 04-001:04-003, 04-006, 04-008, 04-009, 04-016, 04-040, 04-042 СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,1 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ И К СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН. ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОЛЖНО БЫТЬ ОБОСНОВАНО ПРОЕКТОМ.									
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=8,45 Кзпм=20,2 Кмат=25,35									
	1	ОТ					44,14	1,58125	837,60	20,2	16918,68
	2	ЭМ					131,49	1,58125	2495,04	8,45	21082,92
	3	в т.ч. ОТм					21,73	1,58125	412,32	20,2	8328,96
	4	М					279,62	1	3355,44	25,35	85060,44
		ЗТ	чел.-ч	2,42	1,58125	45,9195					
		ЗТм	чел.-ч	1,19	1,58125	22,580244					
		Итого по расценке					455,25		6688,08		123062,04
		ФОТ							1249,92		25247,64
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		1312,42		26510,02	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		749,95		15148,58	

		Всего по позиции							8750,45		164720,64
9	ТЕР-33-04-030-01	Установка разрядников с помощью механизмов (в стесненных условиях населенных пунктов)	компл	22	1	22					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=8,66 Кзпм=20,2 Кмат=10,78									
	1	ОТ					72,03	1,15	1822,26	20,2	36811,72
	2	ЭМ					121,84	1,15	3082,64	8,66	26694,80
	3	в т.ч. ОТм					17,71	1,15	448,14	20,2	9050,80
	4	М					3,4	1	74,80	10,78	806,30
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	штг								
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	4,29	1,15	108,537					
		ЗТм	чел.-ч	0,97	1,15	24,541					
		Итого по расценке					197,27		4979,70		64312,82
		ФОТ							2270,40		45862,52
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи)) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			2383,92		48155,65
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи)) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			1362,24		27517,51
		Всего по позиции							8725,86		139985,98
10	ТЕР-33-04-030-03	Установка разъединителей с помощью механизмов (в стесненных условиях населенных пунктов)	компл	1	1	1					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,89 Кзпм=20,2 Кмат=11,83									
	1	ОТ					154,28	1,15	177,42	20,2	3583,92
	2	ЭМ					132,16	1,15	151,98	10,89	1655,11
	3	в т.ч. ОТм					16,19	1,15	18,62	20,2	376,09
	4	М					2,94	1	2,94	11,83	34,78
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	штг								
	ССЦ01-502-9079	Провода неизолированные	т								

	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	8,09	1,15	9,3035					
		ЗТм	чел.-ч	0,66	1,15	0,759					
		Итого по расценке					289,38		332,34		5273,81
		ФОТ						196,04		3960,01	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		205,84		4158,01	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		117,62		2376,01	
		Всего по позиции							655,8		11807,83

		Всего								
		Прямые затраты						37175,10		510365,29
		оплата труда						9003,89		181880,29
		эксплуатация машин						23449,24		229923,67
		в т.ч. оплата труда машинистов						3459,74		69885,25
		материальные ресурсы						4721,97		98561,33
		в т.ч. материалы учтенные в расценках						4721,97		98561,33
		Итого ФОТ						13131,05		265247,57
		Итого накладные расходы						13086,82		264353,83
		Итого сметная прибыль						7478,17		151059,32
		Итого СМР						57740,09		925778,44
		Итого по разделу сметная стоимость						57740,09		925778,44

Электромонтажные работы

1 1	ТЕРм-08-02-472-09	Проводник заземляющий открыто по строительным основаниям из круглой стали диаметром 12 мм	100м	2,81	1	2,81					
	Инд_ЛОУ2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,55 Кзпм=20,2 Кмат=8,49									
	1	ОТ					379,78	1	1067,18	20,2	21557,08
	2	ЭМ					78,91	1	221,74	9,55	2117,59
	3	в т.ч. ОТм					4,66	1	13,09	20,2	264,51
	4	М					101	1	283,81	8,49	2409,55
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	7,6	1	21,356					
		ЗТ	чел.-ч	21,3	1	59,853					
		ЗТм	чел.-ч	0,19	1	0,5339					
		Итого по расценке					559,69		1572,73		26084,22

		ФОТ							1080,27		21821,59	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) НР = 95% = 95%	%	95	1	95			1026,26		20730,51	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) СП = 65% = 65%	%	65	1	65			702,18		14184,03	
		Всего по позиции							3301,17		60998,76	
1 2	ТЕРм-08-02-472- 11	Перемычка заземляющая тросовая диаметром до 9,2 мм для строительных металлических конструкций	10шт	0,7	1	0,7						
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=8,53 Кзпм=20,2 Кмат=12,61										
	1	ОТ						64,01	1	44,81	20,2	905,10
	2	ЭМ						7,34	1	5,14	8,53	43,83
	3	в т.ч. ОТм						0,25	1	0,18	20,2	3,54
	4	М						6,79	1	4,75	12,61	59,93
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательны е ненормируемые материалы	руб	1,28	1	0,896						
		ЗТ	чел.-ч	3,59	1	2,513						
		ЗТм	чел.-ч	0,01	1	0,007						
		Итого по расценке						78,14		54,70		1008,86
		ФОТ								44,99		908,64
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) НР = 95% = 95%	%	95	1	95			42,74		863,21	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) СП = 65% = 65%	%	65	1	65			29,24		590,62	
		Всего по позиции							126,68		2462,69	
1 3	ТЕРм-08-02-364- 01	Кронштейн «Переход» на опоре	шт	12	1	12						
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=10,83 Кзпм=20,2 Кмат=9,94										
	1	ОТ						16,17	1	194,04	20,2	3919,56
	2	ЭМ						5,37	1	64,44	10,83	697,92
	3	в т.ч. ОТм						0,49	1	5,88	20,2	118,80
	4	М						4,15	1	49,80	9,94	495,00
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательны е ненормируемые материалы	руб	0,32	1	3,84						
		ЗТ	чел.-ч	0,86	1	10,32						
		ЗТм	чел.-ч	0,02	1	0,24						
		Итого по расценке						25,69		308,28		5112,48
		ФОТ								199,92		4038,36
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) НР = 95% = 95%	%	95	1	95			189,92		3836,44	

	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) СП = 65% = 65%	%	65	1	65		129,95		2624,93
		Всего по позиции						628,15		11573,85

		Всего								
		Прямые затраты						1935,71		32205,56
		оплата труда						1306,03		26381,74
		эксплуатация машин						291,32		2859,34
		в т.ч. оплата труда машинистов						19,15		386,85
		материальные ресурсы						338,36		2964,48
		в т.ч. материалы учтенные в расценках						338,36		2964,48
		Итого ФОТ						1389,39		28065,53
		Итого накладные расходы						1258,92		25430,16
		Итого сметная прибыль						861,37		17399,58
		Итого СМР						4056		75035,30
		Итого по разделу сметная стоимость						4056		75035,30

Заземление

14	ТЕР-01-02-057-02	Разработка грунта вручную в траншеях глубиной до 2 м без креплений с откосами, группа грунтов 2 (сильно налипавшего на инструменты грунта) (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 22 * 3 * 0,3 * 0,5	100м3 грунта	0,099	1	0,099						
	2101-3184	ОП П1.1.82; ПРИЛ1.12 ПЗ.184 ПРИМ. (Козп=1,15) ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКЕ ВРУЧНУЮ СИЛЬНО НАЛИПАЮЩЕГО НА ИНСТРУМЕНТЫ ГРУНТА 2 ГРУППЫ К РАСЦЕНКАМ ТАБЛ. 01-02-055 (2, 8), 01-02-056 (2, 8), 01-02-057 (2), 01-02-058 (2, 6), 01-02-061 (2), 01-02-063 (2) СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,15 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ.										
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кзм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ						2277,66	1,3225	298,21	20,2	6023,81
	2	ЭМ							1,15			
	3	в т.ч. ОТм							1,15			
	4	М							1			
		ЗТ	чел.-ч	154	1,3225	20,162835						
		ЗТм	чел.-ч		1,15							
		Итого по расценке						2277,66		298,21		6023,81
		ФОТ								298,21		6023,81
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным	%	80	1	80				238,57		4819,05

		способом) НР = 80% = 80%									
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) СП = 45% = 45%	%	45	1	45			134,19		2710,71
		Всего по позиции							670,97		13553,57
1 5	ТЕР-01-02-061- 01	Засыпка вручную траншей, пазух котлованов и ям, группа грунтов 1 (в стесненных условиях населенных пунктов)	100м3 грунта	0,099	1	0,099					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <S> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					1258,4 7	1,15	143,28	20,2	2894,19
	2	ЭМ						1,15			
	3	в т.ч. ОТм						1,15			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	88,5	1,15	10,075725					
		ЗТм	чел.-ч		1,15						
		Итого по расценке					1258,4 7		143,28		2894,19
		ФОТ							143,28		2894,19
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) НР = 80% = 80%	%	80	1	80			114,62		2315,35
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) СП = 45% = 45%	%	45	1	45			64,48		1302,39
		Всего по позиции							322,38		6511,93
1 6	ТЕР-33-04-015- 01	Устройство заземления опор ВЛ и подстанций (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 22 * 3	10м шин заземлен ия	6,6	1	6,6					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <S> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=9,48 Кзпм=20,2 Кмат=11,91									
	1	ОТ					28,85	1,15	218,98	20,2	4423,25
	2	ЭМ					19,2	1,15	145,73	9,48	1381,51
	3	в т.ч. ОТм						1,15		20,2	

	4	М				1,48	1	9,77	11,91	116,36	
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	1,8	1,15	13,662					
		ЗТм	чел.-ч		1,15						
		Итого по расценке				49,53		374,48		5921,12	
		ФОТ						218,98		4423,25	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		229,93		4644,41	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		131,39		2653,95	
		Всего по позиции						735,8		13219,48	
1 7	ТЕР-33-03-004- 01	Забивка вертикальных заземлителей механизован ная на глубину до 5 м (в стесненных условиях населенных пунктов)	заземлит ель	15	1	15					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=6,27 Кзпм=20,2 Кмат=10,58									
	1	ОТ					12,98	1,15	223,95	20,2	4522,95
	2	ЭМ					119,43	1,15	2060,10	6,27	12917,25
	3	в т.ч. ОТм					11,14	1,15	192,15	20,2	3881,70
	4	М					30,92	1	5,55	10,58	58,65
		ЗТ	чел.-ч	0,81	1,15	13,9725					
		ЗТм	чел.-ч	0,61	1,15	10,5225					
		Итого по расценке				163,33		2289,60		17498,85	
		ФОТ						416,10		8404,65	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105		436,91		8824,88	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60		249,66		5042,79	
		Всего по позиции						2976,17		31366,52	
1 8	ТЕР-33-03-004- 01	Забивка вертикальных заземлителей механизован ная на глубину до 5 м (в стесненных условиях населенных пунктов)	заземлит ель	7	1	7					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									

	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=6,27 Кзпм=20,2 Кмат=10,58										
	на глубину 10 м	Кпз=2										
	1	ОТ					12,98	2,3	208,95	20,2	4221,35	
	2	ЭМ					119,43	2,3	1922,83	6,27	12056,10	
	3	в т.ч. ОТм					11,14	2,3	179,34	20,2	3622,92	
	4	М					30,92	2	5,18	10,58	54,81	
		ЗТ	чел.-ч	0,81	2,3	13,041						
		ЗТм	чел.-ч	0,61	2,3	9,821						
		Итого по расценке					163,33			2136,96		16332,26
		ФОТ								388,29		7844,27
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (27 Линии электропередачи) НР = 105% = 105%	%	105	1	105			407,70		8236,48	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (27 Линии электропередачи) СП = 60% = 60%	%	60	1	60			232,97		4706,56	
		Всего по позиции								2777,63		29275,3

		Всего											
		Прямые затраты									5242,53		48670,23
		оплата труда									1093,37		22085,55
		эксплуатация машин									4128,66		26354,86
		в т.ч. оплата труда машинистов									371,49		7504,62
		материальные ресурсы									20,50		229,82
		в т.ч. материалы учтенные в расценках									20,50		229,82
		Итого ФОТ									1537,68		31061,02
		Итого накладные расходы									1427,73		28840,17
		Итого сметная прибыль									812,69		16416,40
		Итого СМР									7482,95		93926,80
		Итого по разделу сметная стоимость									7482,95		93926,80

Материалы по ССЦ

19	101-1889 ТССЦ_ЛЮ2014_05_2024	Сталь полосовая 40х4 мм, кипящая Объем: 22 * 3 * 1.26 : 1000	т	0,08316	1	0,0832	63203,86	1	459,61	11,44	5258,56		
		Всего по позиции									459,61		5258,56
20	101-2544 ТССЦ_ЛЮ2014_05_2024	Сталь угловая 63х63 мм Объем: 15 * 6 * 2 * 4.81 : 1000	т	0,8658	1	0,8658	59233,11	1	4042,04	12,69	51284,03		
		Всего по позиции									4042,04		51284,03
21	101-3731 ТССЦ_ЛЮ2014_05_2024	Сталь круглая (катанка), диаметром 8 мм Объем: 281 * 0.666 : 1000	т	0,187146	1	0,1871	96268,12	1	1189,61	15,14	18011,77		
		Всего по позиции									1189,61		18011,77

		Всего											
		Прямые затраты									5691,26		74554,36

		материальные ресурсы							5691,26		74554,36
		Итого СМР							5691,26		74554,36
		Итого по разделу сметная стоимость							5691,26		74554,36

Материалы по ПРАЙС

2	Цена	ОПОРЫ	ШТ	34	1	34	12090,83	1,02	105886,20	3,96	419310,10
2	Поставщика	НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ СВ 110-3,5АШ									
		Всего по позиции							105886,2		419310,1
2	Цена	КРЕПЛЕНИЕ	ШТ	12	1	12	1361,42	1,02	4208,04	3,96	16663,80
3	Поставщика	ПОДКОСА У 4									
		Всего по позиции							4208,04		16663,8
2	Цена	ПРОВОД СИП-3	М	3150	1	3150	83,58	1,02	67819,50	3,96	268537,50
4	Поставщика	1X70 ММ2									
		Всего по позиции							67819,5		268537,5
2	Цена	СПИРАЛЬНАЯ	ШТ	90	1	90	112	1,02	2596,50	3,96	10281,60
5	Поставщика	ВЯЗКА СО 70									
		Всего по позиции							2596,5		10281,6
2	Цена	ЗАЖИМ	ШТ	42	1	42	481,01	1,02	5203,80	3,96	20606,46
6	Поставщика	ПРОКАЛЫВАЮ ЩИЙ SLW25.2									
		Всего по позиции							5203,8		20606,46
2	Цена	ЗАЖИМ SO239	ШТ	36	1	36	1016,42	1,02	9425,16	3,96	37323,00
7	Поставщика										
		Всего по позиции							9425,16		37323
2	Цена	Разрядник	ШТ	22	1	22	12850,58	1,02	72820,00	3,96	288366,98
8	Поставщика	длинно-искровой РДИП-10-IV- УХЛ1/001									
		Всего по позиции							72820		288366,98
2	Цена	ЗАЩИТНЫЙ	ШТ	42	1	42	126,91	1,02	1372,98	3,96	5436,90
9	Поставщика	КОЖУХ SP 16 (Кожух КЗ-02)									
		Всего по позиции							1372,98		5436,9
3	Цена	ИЗОЛЯТОР	ШТ	52	1	52	2830,58	1,02	37912,68	3,96	150133,88
0	Поставщика	ШТЫРЕВОЙ SD1 37									
		Всего по позиции							37912,68		150133,88
3	Цена	ИЗОЛЯТОРЫ	ШТ	72	1	72	2100,92	1,02	38962,80	3,96	154291,68
1	Поставщика	НАТЯЖНОЙ SD190.150									
		Всего по позиции							38962,8		154291,68
3	Цена	КОЛПАЧОК	ШТ	72	1	72	16,5	1,02	306,00	3,96	1211,76
2	Поставщика	КП-22									
		Всего по позиции							306		1211,76
3	Цена	УШКО У-1-7-16	ШТ	72	1	72	232,83	1,02	4317,84	3,96	17099,28
3	Поставщика										
		Всего по позиции							4317,84		17099,28
3	Цена	СЕРЬГА СР-6-17	ШТ	72	1	72	115,17	1,02	2136,24	3,96	8457,84
4	Поставщика	(Серьга СР-7-16)									
		Всего по позиции							2136,24		8457,84
3	Цена	СКОБА СК-7	ШТ	72	1	72	159,17	1,02	2952,00	3,96	11689,20
5	Поставщика										
		Всего по позиции							2952		11689,2
3	Цена	ЗАЖИМ	ШТ	56	1	56	98,42	1,02	1419,60	3,96	5621,84
6	Поставщика	СТАЛЬНОЙ ПС- 2-2									
		Всего по позиции							1419,6		5621,84
3	Цена	БАНДАЖНАЯ	ШТ	110	1	110	86	1,02	2436,50	3,96	9649,20
7	Поставщика	ЛЕНТА СОТ 37 (Лента KR-2)									
		Всего по позиции							2436,5		9649,2
3	Цена	СКРЕПА СОТ 36	ШТ	110	1	110	24	1,02	679,80	3,96	2692,80
8	Поставщика	(Скрепа В 200)									
		Всего по позиции							679,8		2692,8

3 9	Цена поставщика	КРОНШТЕЙН Pa4 Объем: 3 * 1	ШТ	3	1	3	359,13	1,02	277,50	3,96	1098,93	
		Всего по позиции								277,5		1098,93
4 0	Цена поставщика	КРОНШТЕЙН KM2	ШТ	1	1	1	1245,9 6	1,02	320,93	3,96	1270,88	
		Всего по позиции								320,93		1270,88
4 1	Цена поставщика	СКОБА KM3	ШТ	4	1	4	192,58	1,02	198,40	3,96	785,72	
		Всего по позиции								198,4		785,72
4 2	Цена поставщика	ХОМУТ X7	ШТ	1	1	1	220,01	1,02	56,67	3,96	224,41	
		Всего по позиции								56,67		224,41
4 3	Цена поставщика	ХОМУТ X8	ШТ	4	1	4	226,95	1,02	233,84	3,96	925,96	
		Всего по позиции								233,84		925,96
4 4	Цена поставщика	ПРОВОДНИК ЗАЗЕМЛЯЮЩИ Й ЗП 1	М	6	1	6	578,5	1,02	894,06	3,96	3540,42	
		Всего по позиции								894,06		3540,42
4 5	Цена поставщика	ИЗОЛЯТОР ШФ 20 Г1	ШТ	5	1	5	490,83	1,02	632,15	3,96	2503,25	
		Всего по позиции								632,15		2503,25
4 6	Цена поставщика	РЛКВ-2- 10IV/400 УХЛ1 с ПР-05-7 с КМЧ и тягами	ШТ	1	1	1	56807, 5	1,02	14632,23	3,96	57943,65	
		Всего по позиции								14632,23		57943,65
4 7	Цена поставщика	ЗАЖИМ АППАРАТНЫЙ A1A-70 (Зажим аппаратный A1A- 70T)	ШТ	4	1	4	126,42	1,02	130,24	3,96	515,80	
		Всего по позиции								130,24		515,8
4 8	Цена поставщика	СИПЗ-1*70 ОШИНОВКА	М	18	1	18	83,58	1,02	387,54	3,96	1534,50	
		Всего по позиции								387,54		1534,5
4 9	Цена Поставщика	Заземляющий проводник ЗП-6	М	7	1	7	510,57	1,02	920,57	3,96	3645,46	
		Всего по позиции								920,57		3645,46
5 0	Цена Поставщика	Оголовок ОГ-54	ШТ	15	1	15	2502,5	1,02	9668,70	3,96	38288,25	
		Всего по позиции								9668,7		38288,25
5 1	Цена Поставщика	Траверса ТМ-77	ШТ	7	1	7	1694,3 5	1,02	3054,94	3,96	12097,68	
		Всего по позиции								3054,94		12097,68
5 2	Цена Поставщика	Глубинный модульно- стержневой заземлитель - 10/1,2		7	1	7	8813	1,02	15890,14	3,96	62924,82	
		Всего по позиции								15890,14		62924,82

		Всего									
		Прямые затраты							407753, 55		161467 3,55
		материальные ресурсы							407753, 55		161467 3,55
		Итого СМР							407753, 55		161467 3,55
		Итого по разделу сметная стоимость							407753, 55		161467 3,55

Погрузка разгрузка

5 3	СПГ-01-01-002- 03	Разгрузка при автомобильных перевозках изделий из сборного железобетона, бетона,	т груза	37,4	1	37,4	15,76	1,15	678,06	20,2	13692,14
--------	----------------------	--	---------	------	---	------	-------	------	--------	------	----------

		керамзитобетона массой до 3 т Объем: 34 * 1.1									
		Всего по позиции							678,06		13692,14
5 4	СПГ-01-01-002- 45	Разгрузка при автомобильных перевозках прочих материалов, деталей (с использованием погрузчика)	т груза	3,17	1	3,17	19,59	1,15	71,42	20,2	1442,57
		Всего по позиции							71,42		1442,57

		Всего									
		Прямые затраты							749,48		15134,7 1
		оплата труда							224,89		4540,41
		эксплуатация машин							524,59		10594,3 0
		Итого ФОТ							224,89		4540,41
		Итого СМР							749,48		15134,7 1
		Итого по разделу сметная стоимость							749,48		15134,7 1

Пусконаладочные работы

5 5	ТЕРп-01-11-027- 01	Измерение токов утечки или пробивного напряжения разрядника	измерени е	22	1	22						
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					39,33	1	865,26	20,2	17478,34	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	1,62	1	35,64						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке						39,33		865,26		17478,34
		ФОТ								865,26		17478,34
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочны е работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65			562,42		11360,92	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочны е работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40			346,10		6991,34	
		Всего по позиции								1773,78		35830,6
5 6	ТЕРп-01-03-005- 01	Разъединитель трехполюсный напряжением до 20 кВ	шт	1	1	1						
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					125,01	1	125,01	20,2	2525,20	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	5,4	1	5,4						

		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					125,01		125,01		2525,20
		ФОТ						125,01		2525,20	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочны е работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65		81,26		1641,38	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочны е работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40		50,00		1010,08	
		Всего по позиции							256,27		5176,66
5 7	ТЕРп-01-11-024- 02	Фазировка электрической линии или трансформатор а с сетью напряжением свыше 1 кВ	фазировк а	1	1	1					
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					39,33	1	39,33	20,2	794,47
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	1,62	1	1,62					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					39,33		39,33		794,47
		ФОТ						39,33		794,47	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочны е работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65		25,56		516,41	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочны е работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40		15,73		317,79	
		Всего по позиции							80,62		1628,67
5 8	ТЕРп-01-11-010- 01	Измерение сопротивления растеканию тока заземлителя	измерени е	22	1	22					
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					29,62	1	651,64	20,2	13163,04
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	1,22	1	26,84					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					29,62		651,64		13163,04
		ФОТ						651,64		13163,04	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочны е работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65		423,57		8555,98	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП- 5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочны е работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40		260,66		5265,22	
		Всего по позиции							1335,87		26984,24

5 9	ТЕРп-01-11-011-01	Проверка наличия цепи между заземлителями и заземленными элементами	100гочек	0,22	1	0,22						
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					314,6	1	69,21	20,2	1398,08	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	12,96	1	2,8512						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке						314,6		69,21		1398,08
		ФОТ							69,21		1398,08	
	МДС81-33.2004 прил. 4	НР (48 Пусконаладочные работы) НР = 65% = 65%	%	65	1	65			44,99		908,75	
	ФАСиЖКХ от 18.11.2004 №АП-5536/06 прил. 1	СП (48 Пусконаладочные работы) СП = 40% = 40%	%	40	1	40			27,68		559,23	
		Всего по позиции								141,88		2866,06

		Всего									
		Прямые затраты							1750,45		35359,13
		оплата труда							1750,45		35359,13
		Итого ФОТ							1808,46		36531,29
		Итого накладные расходы							1137,80		22983,44
		Итого сметная прибыль							700,17		14143,66
		Итого СМР							3588,42		72486,23
		Итого по разделу сметная стоимость							3588,42		72486,23

		Всего									
		Прямые затраты							460298,08		2330962,83
		оплата труда							13378,63		270247,12
		эксплуатация машин							28393,81		269732,17
		в т.ч. оплата труда машинистов							3850,38		77776,72
		материальные ресурсы							418525,64		1790983,54
		в т.ч. материалы учтенные в расценках							5080,83		101755,63
		в т.ч. неучтенные материалы							413444,81		1689227,91
		Итого ФОТ							18091,47		365445,82
		Итого накладные расходы							16911,27		341607,60
		Итого сметная прибыль							9852,40		199018,96
		Итого СМР							487061,75		2871589,39
		Итого сметная стоимость							487061,75		2871589,39

МС РФ от 19.06.2020 №332/пр, п.50.	Временные здания и сооружения		2,5 %	71789,7 4
	Итого с ВЗиС			294337 9,13
МС РФ от 25.05.2021 №325/пр, п.85.	Зимнее удорожание		1,9 %	55924,2 0
	Итого с зимним удорожанием			299930 3,33
	Итого с оборудованием			299930 3,33
МС РФ от 04.08.2020 №421/пр	Непредвиденные работы и затраты		3 %	89979,0 9
	Итого без НДС			308928 2,42
НК РФ ч.2 Глава 21 от 05.08.2000 №117-ФЗ	НДС		20 %	617856, 48
	ИТОГО			370713 8,90

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №3

Строительство КТП-100/10/0,4 кВ

(наименование работ и затрат)

Составлена Базисно-индексным методом

Основание (проектная и (или) иная техническая документация)

Составлен(а) в текущем (базисном) уровне цен база

Сметная стоимость	1823,96	(176,95)	тыс. руб.		118,53	5,89	тыс. руб.
в том числе:				Средства на оплату труда рабочих			
строительных работ	358,17	(16,91)	тыс. руб.	Нормативные затраты труда рабочих		313	чел. час.
монтажных работ	119,06	(4,84)	тыс. руб.	Нормативные затраты труда машинистов		22	чел. час.
оборудования	1231,29	(151,17)	тыс. руб.				
прочих затрат	115,43	(4,03)	тыс. руб.				

№ п/п	Обоснование	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в текущем уровне цен (гр. 8) для ресурсов, учтенных за расценкой и перевозки), руб.			Индексы	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	коэффициенты	всего с учетом коэффициентов	на единицу	коэффициенты	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Строительные работы

1	ТЕР-01-01-036-01	Планировка площадей бульдозерами мощностью 59 кВт (80л.с.) (в стесненных условиях населенных пунктов)	1000м2 спланированной по	0,037	1	0,037						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Кзп=20,2 Кэм=17,54 Кзпм=20,2										
	1	ОТ						1,15		20,2		
	2	ЭМ					28,47	1,15	1,21	17,54	21,25	
	3	в т.ч. ОТм					7,98	1,15	0,34	20,2	6,86	
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч		1,15							
		ЗТм	чел.-ч	0,38	1,15	0,016169						
		Итого по расценке					28,47		1,21		21,25	

		ФОТ							0,34		6,86	
		НР (1.1 Земляные работы, выполняемые механизованн ым способом) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			0,28		6,52	
		СП (1.1 Земляные работы, выполняемые механизованн ым способом) Баз. итоги: СП = 50%*0,8 = 40% Тек. итоги: СП = 50% = 50%	%		1	40			0,14		3,43	
		Всего по позиции							1,63		31,2	
2	ТЕР-01-01-004-02	Разработка грунта в отвал экскаваторами «драглайн» или «обратная лопата» с ковшом емкостью 0,4 (0,3-0,45) м3, грунта групп 2 (в стесненных условиях населенных пунктов)	1000м3 грунта	0,0077	1	0,0077						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=13,26 Кзпм=20,2										
	1	ОТ					126,31	1,15	1,12	20,2	22,59	
	2	ЭМ					4323,24	1,15	38,28	13,26	507,63	
	3	в т.ч. ОТм					911,78	1,15	8,07	20,2	163,09	
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	8,54	1,15	0,075622						
		ЗТм	чел.-ч	37,17	1,15	0,32914						
		Итого по расценке						4449,55		39,40		530,22
		ФОТ							9,19		185,68	
		НР (1.1 Земляные работы, выполняемые механизованн ым способом) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			7,44		176,40	
		СП (1.1 Земляные работы, выполняемые механизованн ым способом) Баз. итоги: СП = 50%*0,8 = 40% Тек. итоги: СП = 50% = 50%	%		1	40			3,68		92,84	
		Всего по позиции							50,52		799,46	

3	ТЕР-01-02-005-01	Уплотнение грунта пневматическими трамбовками, группа грунтов 1-2 (в стесненных условиях населенных пунктов)	100м3 уплотненно го грунт	0,077	1	0,077						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим 1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,47 Кзпм=20,2										
	1	ОТ					202,61	1,15	17,94	20,2	362,41	
	2	ЭМ					311,22	1,15	27,56	9,47	260,98	
	3	в т.ч. ОТм					55,51	1,15	4,92	20,2	99,29	
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	12,53	1,15	1,109532						
		ЗТм	чел.-ч	3,04	1,15	0,269192						
		Итого по расценке					513,83		45,50		623,39	
		ФОТ							22,86		461,70	
		НР (1.1 Земляные работы, выполняемые механизированным способом) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			18,52		438,62	
		СП (1.1 Земляные работы, выполняемые механизированным способом) Баз. итоги: СП = 50%*0,8 = 40% Тек. итоги: СП = 50% = 50%	%		1	40			9,14		230,85	
		Всего по позиции							73,16		1292,86	
4	ТЕР-08-01-002-01	Устройство основания под фундаменты песчаного (в стесненных условиях населенных пунктов)	м3 основания	3,4	1	3,4						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим 1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=8,58 Кзпм=20,2 Кмат=16,48										
	1	ОТ					35,6	1,15	139,20	20,2	2811,77	
	2	ЭМ					38,71	1,15	151,37	8,58	1298,63	
	3	в т.ч. ОТм					5,51	1,15	21,56	20,2	435,20	
	4	М					115,14	1	391,47	16,48	6451,53	
		ЗТ	чел.-ч	2,3	1,15	8,993						
		ЗТм	чел.-ч	0,29	1,15	1,1339						
		Итого по расценке					189,45		682,04		10561,93	

		ФОТ							160,76		3246,97
		НР (8 Конструкции из кирпича и блоков) Баз. итоги: НР = 122%*0,85 = 104% Тек. итоги: НР = 122% = 122%	%		1	104			167,19		3961,30
		СП (8 Конструкции из кирпича и блоков) Баз. итоги: СП = 80%*0,8 = 64% Тек. итоги: СП = 80% = 80%	%		1	64			102,89		2597,58
		Всего по позиции							952,12		17120,81
5	ТЕР-08-01-002-02	Устройство основания под фундаменты щебеночного (в стесненных условиях населенных пунктов)	м3 основания	4	1	4					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=8,9 Кзпм=20,2 Кмат=8,04									
	1	ОТ					37,15	1,15	170,88	20,2	3451,96
	2	ЭМ					64,03	1,15	294,52	8,9	2621,40
	3	в т.ч. ОТм					10,08	1,15	46,36	20,2	936,64
	4	М					335,18	1	1340,72	8,04	10779,40
		ЗТ	чел.-ч	2,4	1,15	11,04					
		ЗТм	чел.-ч	0,54	1,15	2,484					
		Итого по расценке					436,36		1806,12		16852,76
		ФОТ							217,24		4388,60
		НР (8 Конструкции из кирпича и блоков) Баз. итоги: НР = 122%*0,85 = 104% Тек. итоги: НР = 122% = 122%	%		1	104			225,93		5354,09
		СП (8 Конструкции из кирпича и блоков) Баз. итоги: СП = 80%*0,8 = 64% Тек. итоги: СП = 80% = 80%	%		1	64			139,03		3510,88
		Всего по позиции							2171,08		25717,73
6	ТЕР-07-01-001-01	Укладка блоков и плит ленточных фундаментов при глубине котлована до 4 м, масса конструкций до 0,5 т (в стесненных условиях населенных пунктов)	100шт сборных конструкции	0,07	1	0,07					

2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,74 Кзпм=20,2 Кмат=19,1									
1	ОТ					1199,17	1,15	96,53	20,2	1949,97
2	ЭМ					2774,23	1,15	223,33	10,74	2398,52
3	в т.ч. ОТм					565,09	1,15	45,49	20,2	918,89
4	М					671,04	1	46,97	19,1	897,18
ССЦ01-403-9020	Конструкции сборные железобетонные	штг	100		1	7				
	ЗТ	чел.-ч	72,37		1,15	5,825785				
	ЗТм	чел.-ч	23,38		1,15	1,88209				
	Итого по расценке					4644,44		366,83		5245,67
	ФОТ							142,02		2868,86
	НР (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: НР = 130%*0,85 = 111% Тек. итоги: НР = 130% = 130%	%			1	111			157,64	3729,52
	СП (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: СП = 85%*0,8 = 68% Тек. итоги: СП = 85% = 85%	%			1	68			96,57	2438,53
	Всего по позиции							621,04		11413,72
7	ТЕР-07-01-001-02	Укладка блоков и плит ленточных фундаментов при глубине котлована до 4 м, масса конструкций до 1,5 т (в стесненных условиях населенных пунктов)	100шт сборных конструкции	0,03	1	0,03				
2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,86 Кзпм=20,2 Кмат=19,1									
1	ОТ					1537,63	1,15	53,05	20,2	1071,57
2	ЭМ					3919,88	1,15	135,24	10,86	1468,67
3	в т.ч. ОТм					747,43	1,15	25,79	20,2	520,88
4	М					1537,8	1	46,13	19,1	881,16
ССЦ01-403-9020	Конструкции сборные железобетонные	штг	100		1	3				
	ЗТ	чел.-ч	91,58		1,15	3,15951				

		ЗТм	чел.-ч	31,26	1,15	1,07847					
		Итого по расценке					6995,31		234,42		3421,40
		ФОТ						78,84		1592,45	
		НР (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: НР = 130%*0,85 = 111% Тек. итоги: НР = 130% = 130%	%		1	111			87,51	2070,19	
		СП (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: СП = 85%*0,8 = 68% Тек. итоги: СП = 85% = 85%	%		1	68			53,61	1353,58	
		Всего по позиции							375,54		6845,17
8	ТЕР-33-04-028-04	Установка оборудования для комплектных трансформаторных подстанций шкафового типа (в стесненных условиях населенных пунктов)	подстанция	1	1	1					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Кзпм=20,2 Кэм=11,26 Кзпм=20,2									
	1	ОТ					497,73	1,15	572,39	20,2	11562,27
	2	ЭМ					467,72	1,15	537,88	11,26	6056,51
	3	в т.ч. ОТм					91,25	1,15	104,94	20,2	2119,74
	4	М						1			
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
		ЗТ	чел.-ч	26,89	1,15	30,9235					
		ЗТм	чел.-ч	3,72	1,15	4,278					
		Итого по расценке					965,45		1110,27		17618,78
		ФОТ							677,33	13682,01	
		НР (27 Линии электропередачи)) Баз. итоги: НР = 105%*0,85 = 89% Тек. итоги: НР = 105% = 105%	%		1	89			602,82	14366,11	
		СП (27 Линии электропередачи)) Баз. итоги: СП = 60%*0,8 = 48% Тек. итоги: СП = 60% = 60%	%		1	48			325,12	8209,21	
		Всего по позиции							2038,21		40194,1

9	ТЕР-07-01-044-01	Установка арматурных стыковых накладок обвязка блоков уголком 50*50*5 (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 3.77 * 16 : 1000	т стальных элементов	0,0603 2	1	0,0603						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Кзп=20,2 Кэм=7,92 Кзпм=20,2 Кмат=9,82										
	1	ОТ					3289,5	1,15	228,11	20,2	4607,83	
	2	ЭМ					550,33	1,15	38,16	7,92	302,25	
	3	в т.ч. ОТм						1,15		20,2		
	4	М					7446,6 5	1	62,64	9,82	615,11	
		ЗТ	чел.-ч	170	1,15	11,78865						
		ЗТм	чел.-ч		1,15							
		Итого по расценке						11286,48		328,91		5525,19
		ФОТ							228,11		4607,83	
		НР (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: НР = 130%*0,85 = 111% Тек. итоги: НР = 130% = 130%	%		1	111			253,20		5990,18	
		СП (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: СП = 85%*0,8 = 68% Тек. итоги: СП = 85% = 85%	%		1	68			155,11		3916,66	
		Всего по позиции								737,22		15432,03
10	ТЕР-08-01-003-07	Гидроизоляция боковая обмазочная битумная в 2 слоя по выровненной поверхности бугровой кладки, кирпичу, бетону (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 2.773 * 10	100м2 изолируемой поверх	0,2773	1	0,2773						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										

	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=6,85 Кзпм=20,2 Кмат=10,7									
	1	ОТ					382,24	1,15	121,90	20,2	2462,27
	2	ЭМ					83,64	1,15	26,67	6,85	182,70
	3	в т.ч. ОТм						1,15		20,2	
	4	М					1064,47	1	295,18	10,7	3158,40
		ЗТ	чел.-ч	21,2	1,15	6,760574					
		ЗТм	чел.-ч		1,15						
		Итого по расценке					1530,35		443,75		5803,37
		ФОТ							121,90		2462,27
		НР (8 Конструкции из кирпича и блоков) Баз. итоги: НР = $122\% * 0,85 = 104\%$ Тек. итоги: НР = $122\% = 122\%$	%		1	104				126,78	3003,97
		СП (8 Конструкции из кирпича и блоков) Баз. итоги: СП = $80\% * 0,8 = 64\%$ Тек. итоги: СП = $80\% = 80\%$	%		1	64				78,02	1969,82
		Всего по позиции							648,55		10777,16
1	ТЕР-33-04-030-01	Установка разрядников с помощью механизмов (в стесненных условиях населенных пунктов) Объем: 1 + 1	компл	2	1	2					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Т61 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, т61, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=8,66 Кзпм=20,2 Кмат=10,78									
	1	ОТ					72,03	1,15	165,66	20,2	3346,52
	2	ЭМ					121,84	1,15	280,24	8,66	2426,80
	3	в т.ч. ОТм					17,71	1,15	40,74	20,2	822,80
	4	М					3,4	1	6,80	10,78	73,30
	ССЦ01-110-9030	Изоляторы штыревые	штг								
	ССЦ01-201-9261	Детали крепления стальные	кг								
	ССЦ01-201-9266	Хомуты стальные	кг								
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т								
		ЗТ	чел.-ч	4,29	1,15	9,867					
		ЗТм	чел.-ч	0,97	1,15	2,231					
		Итого по расценке					197,27		452,70		5846,62
		ФОТ							206,40		4169,32
		НР (27 Линии электропередачи) Баз. итоги: НР = $105\% * 0,85 = 89\%$	%		1	89				183,70	4377,79

		Тек. итоги: НР = 105% = 105%								
		СП (27 Линии электропередачи) Баз. итоги: СП = 60%*0,8 = 48% Тек. итоги: СП = 60% = 60%	%		1	48			99,07	2501,59
		Всего по позиции							735,47	12726

		Всего								
		Прямые затраты							5511,15	72050,58
		оплата труда							1566,78	31649,16
		эксплуатация машин							1754,46	17545,34
		в т.ч. оплата труда машинистов							298,21	6023,39
		материальные ресурсы							2189,91	22856,08
		в т.ч. материалы учтенные в расценках							2189,91	22856,08
		Итого ФОТ							1958,36	39889,77
		Итого накладные расходы							1831,01	43474,69
		Итого сметная прибыль							1062,38	26824,97
		Итого СМР							8404,54	142350,24
		Итого по разделу сметная стоимость							8404,54	142350,24

Электромонтажные работы

1 2	ТЕРм-08-01-068-01	Шина сборная - одна полоса в фазе, медная или алюминиевая сечением до 250 мм ² (в стесненных условиях населенных пунктов)	100м	0,09	1	0,09						
	2020М-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=14,16 Кзпм=20,2 Кмат=11,06										
	1	ОТ					957,6	1,15	99,11	20,2	2002,05	
	2	ЭМ					216,02	1,15	22,36	14,16	316,59	
	3	в т.ч. ОТм					109,28	1,15	11,31	20,2	228,47	
	4	М					122,48	1	11,02	11,06	121,92	
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	19,15	1	1,7235						
		ЗТ	чел.-ч	52,5	1,15	5,43375						
		ЗТм	чел.-ч	5,91	1,15	0,611685						
		Итого по расценке					1296,1		132,49		2440,56	
		ФОТ							110,42		2230,52	

		НР (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			89,44		2118,99
		СП (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) Баз. итоги: СП = 65%*0,8 = 52% Тек. итоги: СП = 65% = 65%	%		1	52			57,42		1449,84
		Всего по позиции							279,35		6009,39
1 3	ТЕРм-08-01- 062-01	Трансформатор силовой, автотрансформ атор или масляный реактор, масса до 1 т (в стесненных условиях населенных пунктов)	шт	1	1	1					
	2020М-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2 Кэм=11,09 Кзпм=20,2 Кмат=18,28									
	1	ОТ					392,16	1,15	450,98	20,2	9109,88
	2	ЭМ					607,24	1,15	698,33	11,09	7744,44
	3	в т.ч. ОТм					80,95	1,15	93,09	20,2	1880,47
	4	М					466,64	1	466,64	18,28	8530,18
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательны е ненормируемые материалы	руб	7,84	1	7,84					
		ЗТ	чел.-ч	21,5	1,15	24,725					
		ЗТм	чел.-ч	3,3	1,15	3,795					
		Итого по расценке							1466,0 4	1615,95	25384,50
		ФОТ							544,07		10990,35
		НР (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			440,70		10440,83
		СП (45.2 Электромонтаж ные работы на других объектах) Баз. итоги: СП = 65%*0,8 = 52% Тек. итоги: СП = 65% = 65%	%		1	52			282,92		7143,73
		Всего по позиции							2339,57		42969,06
1 4	ТЕРм-08-02- 144-05	Присоединение к зажимам жил проводов или кабелей сечением до 70 мм2 (в стесненных условиях	100шт	0,14	1	0,14					

		населенных пунктов)										
	2020М-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кмат=20,19										
	1	ОТ				275,79	1,15	44,41	20,2	896,93		
	2	ЭМ					1,15					
	3	в т.ч. ОТм					1,15					
	4	М				5,52	1	0,77	20,19	15,60		
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	5,52	1	0,7728						
		ЗТ	чел.-ч	15,12	1,15	2,43432						
		ЗТм	чел.-ч		1,15							
		Итого по расценке					281,31		45,18		912,53	
		ФОТ						44,41		896,93		
		НР (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			35,97		852,08	
		СП (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) Баз. итоги: СП = 65%*0,8 = 52% Тек. итоги: СП = 65% = 65%	%		1	52			23,09		583,00	
		Всего по позиции							104,24		2347,61	
15	ТЕРм-08-02-471-02	Заземлитель вертикальный из угловой стали размером 63х63х6 мм (в стесненных условиях населенных пунктов)	10шт	1,4	1	1,4						
	2020М-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=10,28 Кзпм=20,2 Кмат=5,15										
	1	ОТ				210,39	1,15	338,73	20,2	6842,31		
	2	ЭМ				95,04	1,15	153,02	10,28	1572,98		
	3	в т.ч. ОТм				7,36	1,15	11,84	20,2	239,36		
	4	М				82,44	1	115,42	5,15	594,40		
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	4,21	1	5,894						
		ЗТ	чел.-ч	11,8	1,15	18,998						
		ЗТм	чел.-ч	0,3	1,15	0,483						

		Итого по расценке				387,87		607,17		9009,69	
		ФОТ						350,57		7081,67	
		НР (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81		283,96		6727,59	
		СП (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) Баз. итоги: СП = 65%*0,8 = 52% Тек. итоги: СП = 65% = 65%	%		1	52		182,30		4603,09	
		Всего по позиции						1073,43		20340,37	
16	ТЕРМ-08-01-079-01	Мост шинный для сборных распределительных устройств, количество опорных изоляторов 9 (в стесненных условиях населенных пунктов)	шт	1	1	1					
	2020М-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,03 Кзпм=20,2 Кмат=11,72									
	1	ОТ					280,9	1,15	323,04	20,2	6525,31
	2	ЭМ					42,29	1,15	48,63	9,03	439,16
	3	в т.ч. ОТм					4,34	1,15	4,99	20,2	100,82
	4	М					240,03	1	240,03	11,72	2813,15
	ССЦ01-999-9950	Вспомогательные ненормируемые материалы	руб	5,62	1	5,62					
		ЗТ	чел.-ч	15,4	1,15	17,71					
		ЗТм	чел.-ч	0,19	1,15	0,2185					
		Итого по расценке					563,22		611,70		9777,62
		ФОТ							328,03		6626,13
		НР (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) Баз. итоги: НР = 95%*0,85 = 81% Тек. итоги: НР = 95% = 95%	%		1	81			265,70		6294,82
		СП (45.2 Электромонтажные работы на других объектах) Баз. итоги: СП = 65%*0,8 = 52% Тек. итоги: СП = 65% = 65%	%		1	52			170,58		4306,98
		Всего по позиции							1047,98		20379,42
		Всего									
		Прямые затраты							3012,49		47524,90

		оплата труда					1256,27			25376,48
		эксплуатация машин					922,34			10073,17
		в т.ч. оплата труда машинистов					121,23			2449,12
		материальные ресурсы					833,88			12075,25
		в т.ч. материалы учтенные в расценках					833,88			12075,25
		Итого ФОТ					1434,40			29173,76
		Итого накладные расходы					1115,77			26434,31
		Итого сметная прибыль					716,31			18086,64
		Итого СМР					4844,57			92045,85
		Итого по разделу сметная стоимость					4844,57			92045,85

Погрузо-разгрузочные работы

17	СПГ-01-01-002-15	Разгрузка при автомобильных перевозках металлических конструкций массой до 1 т	т груза	1,3	1	1,3	32,6	1	42,38	20,2	856,08
		Всего по позиции							42,38		856,08
18	СПГ-01-01-001-39	Погрузка при автомобильных перевозках грунта растительного слоя (земля, перегной) Объем: 7.7 * 1.8	т груза	13,86	1	13,86	5,19	1	71,93	20,2	1453,08
		Всего по позиции							71,93		1453,08
19	СПГ-03-21-001-15	Перевозка грузов I класса автомобилями-самосвалами грузоподъемностью 10 т работающих вне карьера на расстояние до 15 км	т груза	13,86	1	13,86	17,57	1	243,52	13,26	3228,96
		Всего по позиции							243,52		3228,96
20	СПГ-01-01-002-03	Разгрузка при автомобильных перевозках изделий из сборного железобетона, бетона, керамзитобетона массой до 3 т блоки фбе Объем: 0.64 * 3 + 0.47 * 7	т груза	5,21	1	5,21	15,76	1	82,11	20,2	1658,66
		Всего по позиции							82,11		1658,66

		Всего									
		Прямые затраты					439,94				7196,78
		оплата труда					132,01				2159,02
		эксплуатация машин					307,93				5037,76
		Итого ФОТ					132,01				2159,02
		Итого СМР					439,94				7196,78
		Итого по разделу сметная стоимость					439,94				7196,78

Заземление

2 1	ТЕР-01-02-055-02	Разработка грунта вручную с креплениями в траншеях шириной до 2 м, глубиной до 2 м, группа грунтов 2 (сильно налипавшего на инструменты грунта) (в стесненных условиях населенных пунктов)	100м3 грунта	0,059	1	0,059						
	2101-3184	ОП П1.1.82; ПРИЛ1.12 ПЗ.184 ПРИМ. (Козп=1,15) ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКЕ ВРУЧНУЮ СИЛЬНО НАЛИПАЮЩЕГО НА ИНСТРУМЕНТЫ ГРУНТА 2 ГРУППЫ К РАСЦЕНКАМ ТАБЛ. 01-02-055 (2, 8), 01-02-056 (2, 8), 01-02-057 (2), 01-02-058 (2, 6), 01-02-061 (2), 01-02-063 (2) СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ КОЭФ. К=1,15 К НОРМАМ ЗАТРАТ ТРУДА И ОПЛАТЕ ТРУДА РАБОЧИХ-СТРОИТЕЛЕЙ.										
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					3003,2 1	1,3225	234,33	20,2	4733,53	
	2	ЭМ						1,15				
	3	в т.ч. ОТм						1,15				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	189	1,3225	14,747197						
		ЗТм	чел.-ч		1,15							
		Итого по расценке						3003,2 1		234,33		4733,53
		ФОТ							234,33		4733,53	
		НР (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) Баз. итоги: НР = 80%*0,85 = 68% Тек. итоги: НР = 80% = 80%	%		1	68			159,34		3786,82	
		СП (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) Баз. итоги: СП = 45%*0,8 = 36% Тек. итоги: СП = 45% = 45%	%		1	36			84,36		2130,09	
		Всего по позиции								478,03		10650,44
2 2	ТЕР-01-02-061-01	Засыпка вручную траншей, паух котлованов и ям, группа грунтов 1 (в стесненных условиях населенных пунктов)	100м3 грунта	0,059	1	0,059						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										

	1	ОТ				1258,47	1,15	85,39	20,2	1724,82
	2	ЭМ					1,15			
	3	в т.ч. ОТм					1,15			
	4	М					1			
		ЗТ	чел.-ч	88,5	1,15	6,004725				
		ЗТм	чел.-ч		1,15					
		Итого по расценке				1258,47		85,39		1724,82
		ФОТ						85,39		1724,82
		НР (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) Баз. итоги: НР = $80\% * 0,85 = 68\%$ Тек. итоги: НР = $80\% = 80\%$	%		1	68		58,07		1379,86
		СП (1.2 Земляные работы, выполняемые ручным способом) Баз. итоги: СП = $45\% * 0,8 = 36\%$ Тек. итоги: СП = $45\% = 45\%$	%		1	36		30,74		776,17
		Всего по позиции						174,2		3880,85
2 3	ТЕР-33-04-015-01	Устройство заземления опор ВЛ и подстанций (в стесненных условиях населенных пунктов)	10м шин заземления	2,8	1	2,8				
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.								
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,48 Кзпм=20,2 Кмат=11,91								
	1	ОТ				28,85	1,15	92,91	20,2	1876,53
	2	ЭМ				19,2	1,15	61,82	9,48	586,10
	3	в т.ч. ОТм					1,15		20,2	
	4	М				1,48	1	4,14	11,91	49,36
	ССЦ01-101-9341	Сталь стержневая диаметром до 10 мм	т							
		ЗТ	чел.-ч	1,8	1,15	5,796				
		ЗТм	чел.-ч		1,15					
		Итого по расценке				49,53		158,87		2511,99
		ФОТ						92,91		1876,53
		НР (27 Линии электропередачи) Баз. итоги: НР = $105\% * 0,85 = 89\%$ Тек. итоги: НР = $105\% = 105\%$	%		1	89		82,69		1970,36
		СП (27 Линии электропередачи) Баз. итоги: СП = $60\% * 0,8 = 48\%$ Тек. итоги: СП = $60\% = 60\%$	%		1	48		44,60		1125,92

		Всего по позиции						286,16		5608,27
		Всего								
		Прямые затраты						478,59		8970,34
		оплата труда						412,63		8334,88
		эксплуатация машин						61,82		586,10
		материальные ресурсы						4,14		49,36
		в т.ч. материалы учтенные в расценках						4,14		49,36
		Итого ФОТ						427,94		8698,87
		Итого накладные расходы						300,10		7137,04
		Итого сметная прибыль						159,70		4032,18
		Итого СМР						938,39		20139,56
		Итого по разделу сметная стоимость						938,39		20139,56

Оборудование

2 4		КТП-100/10/0,4 кВ	ШТ	1	1	1	937500	1,0626	151166,54	6,59	996187,50
		Всего по позиции							151166,54		996187,50

		Всего									
		Прямые затраты							151166,54		996187,50
		Итого оборудование							151166,54		996187,50
		Итого по разделу сметная стоимость							151166,54		996187,50

Ограждение КТП

2 5	ТЕР-09-08-001-01	Установка металлических столбов высотой до 4 м с погружением в бетонное основание (в стесненных условиях населенных пунктов)	100столбов	0,1	1	0,1					
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=15,64 Кзпм=20,2 Кмат=27,62									
	1	ОТ					576,3	1,15	66,28	20,2	1338,75
	2	ЭМ					3973,7	1,15	456,97	15,64	7147,09
	3	в т.ч. ОТм					492,78	1,15	56,67	20,2	1144,73
	4	М					211,3	1	21,13	27,62	583,61
	ССЦ01-401-9021	Бетон	м3	6,34	1	0,634					
	ССЦ01-201-9212	Стойки металлические опорные	шт	100	1	10					
		ЗТ	чел.-ч	35,64	1,15	4,0986					
		ЗТм	чел.-ч	21,67	1,15	2,49205					
		Итого по расценке					4761,3		544,38		9069,45
		ФОТ							122,95		2483,48

		НР (9 Строительные металлические конструкции) Баз. итоги: НР = 90%*0,85 = 77% Тек. итоги: НР = 90% = 90%	%		1	77			94,67		2235,13	
		СП (9 Строительные металлические конструкции) Баз. итоги: СП = 85%*0,8 = 68% Тек. итоги: СП = 85% = 85%	%		1	68			83,61		2110,96	
		Всего по позиции							722,66		13415,54	
2 6	ТЕР-09-08-002-05	Устройство заграждений из готовых металлических решетчатых панелей высотой до 2 м (в стесненных условиях населенных пунктов)	10панелей	0,9	1	0,9						
	2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.										
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=12,86 Кзпм=20,2										
	1	ОТ						114,97	1,15	119,00	20,2	2403,68
	2	ЭМ						33,05	1,15	34,21	12,86	439,90
	3	в т.ч. ОТм						11,96	1,15	12,38	20,2	250,05
	4	М							1			
	ССЦ01-201-9104	Панель металлическая решетчатая для барьерных ограждений	шт	10	1	9						
	ССЦ01-101-9283	Детали крепления барьерных ограждений	компл	120	1	108						
		ЗТ	чел.-ч	7,11	1,15	7,35885						
		ЗТм	чел.-ч	0,57	1,15	0,58995						
		Итого по расценке						148,02		153,21		2843,58
		ФОТ								131,38		2653,73
		НР (9 Строительные металлические конструкции) Баз. итоги: НР = 90%*0,85 = 77% Тек. итоги: НР = 90% = 90%	%		1	77			101,16		2388,36	
		СП (9 Строительные металлические конструкции) Баз. итоги: СП = 85%*0,8 = 68% Тек. итоги: СП = 85% = 85%	%		1	68			89,34		2255,67	
		Всего по позиции							343,71		7487,61	
2 7	ТЕР-07-01-055-08	Устройство калиток с установкой столбов металлических (в стесненных условиях)	100шт	0,01	1	0,01						

	населенных пунктов)									
2020С-101-5	МС РФ 421/пр от 4.08.20 Прил10 Тб1 п5 прим1.1, 1.2, 1.3 (Кзтр=1,15; Кэм=1,15) При производстве работ в стесненных условиях населенных пунктов (см. перечень в прим. <5> к Прил.10, тб1, п5), к затратам труда рабочих и машинистов, времени эксплуатации машин и механизмов следует применять коэф. -К=1,15-. Коэффициенты не распространяются на работы, выполняемые в помещениях объектов капитального строительства. Одновременное применение нескольких коэф., приведенных в таблице 1, не допускается.									
Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2 Кэм=9,59 Кзпм=20,2 Кмат=14,11									
1	ОТ					16086,22	1,15	184,98	20,2	3736,83
2	ЭМ					464,05	1,15	5,34	9,59	51,18
3	в т.ч. ОТм					1,68	1,15	0,02	20,2	0,39
4	М					2269,52	1	22,70	14,11	320,23
ССЦ01-201-9110	Полотна калиток	шт	100	1	1					
ССЦ01-201-9212	Стойки металлические опорные	шт	100	1	1					
	ЗТ	чел.-ч	855,65	1,15	9,839975					
	ЗТм	чел.-ч	0,08	1,15	0,00092					
	Итого по расценке					18819,79		213,02		4108,24
	ФОТ							185,00		3737,22
	НР (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: НР = 130%*0,85 = 111% Тек. итоги: НР = 130% = 130%	%		1	111			205,35		4858,39
	СП (7.1 Бетонные и железобетонные сборные конструкции в промышленном строительстве:) Баз. итоги: СП = 85%*0,8 = 68% Тек. итоги: СП = 85% = 85%	%		1	68			125,80		3176,64
	Всего по позиции							544,17		12143,27

	Всего									
	Прямые затраты							910,61		16021,27
	оплата труда							370,26		7479,26
	эксплуатация машин							496,52		7638,17
	в т.ч. оплата труда машинистов							69,07		1395,17
	материальные ресурсы							43,83		903,84
	в т.ч. материалы учтенные в расценках							43,83		903,84
	Итого ФОТ							459,79		9358,01
	Итого накладные расходы							401,18		9481,88
	Итого сметная прибыль							298,75		7543,27
	Итого СМР							1610,54		33046,42
	Итого по разделу сметная стоимость							1610,54		33046,42

28	ТЕРп-01-11-010-02	Измерение сопротивления растеканию тока контура с диагональю до 20 м	измерение	1	1	1						
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					39,33	1	39,33	20,2	794,47	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	1,62	1	1,62						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					39,33			39,33		794,47
		ФОТ							39,33		794,47	
		НР (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			21,63		516,41	
		СП (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			12,59		317,79	
		Всего по позиции							73,55		1628,67	
29	ТЕРп-01-02-002-01	Трансформатор силовой трехфазный масляный двухобмоточный напряжением до 11 кВ, мощностью до 0,32 МВА	шт	1	1	1						
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					154,82	1	154,82	20,2	3127,36	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	6,3	1	6,3						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					154,82			154,82		3127,36
		ФОТ							154,82		3127,36	
		НР (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			85,15		2032,78	
		СП (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			49,54		1250,94	
		Всего по позиции							289,51		6411,08	
30	ТЕРп-01-12-010-01	Испытание обмотки трансформатора силового	испытание	2	1	2						

	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					59,39	1	118,78	20,2	2399,36	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	2,43	1	4,86						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					59,39			118,78		2399,36
		ФОТ							118,78		2399,36	
		НР (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			65,33		1559,58	
		СП (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			38,01		959,74	
		Всего по позиции								222,12		4918,68
31	ТЕРп-01-11-027-02	Измерение токов утечки ограничителя напряжения	измерение	6	1	6						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					49,04	1	294,24	20,2	5943,66	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	2,02	1	12,12						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке					49,04			294,24		5943,66
		ФОТ							294,24		5943,66	
		НР (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			161,83		3863,38	
		СП (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			94,16		2377,46	
		Всего по позиции								550,23		12184,5
32	ТЕРп-01-03-008-01	Выключатель нагрузки напряжением до 11 кВ	шт	3	1	3						
	Инд_ЛО2014_05_2024	Козп=20,2										
	1	ОТ					187,52	1	562,56	20,2	11363,70	
	2	ЭМ						1				
	3	в т.ч. ОТм						1				
	4	М						1				
		ЗТ	чел.-ч	8,1	1	24,3						

		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					187,52		562,56		11363,70
		ФОТ						562,56		11363,70	
		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			309,41	7386,41	
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			180,02	4545,48	
		Всего по позиции							1051,99		23295,59
3 3	ТЕРп-01-02- 018-01	Трансформатор тока измерительный нулевой последовательн ости без подмагничиван ия	шт	3	1	3					
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					41,36	1	124,08	20,2	2506,41
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	1,8	1	5,4					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					41,36		124,08		2506,41
		ФОТ							124,08		2506,41
		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			68,24		1629,17
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			39,71		1002,56
		Всего по позиции							232,03		5138,14
3 4	ТЕРп-01-12- 020-01	Испытание сборных и соединительны х шин напряжением до 11 кВ	испытание	2	1	2					
	Инд_ЛО2014_05 _2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					158,4	1	316,80	20,2	6399,36
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	7,29	1	14,58					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					158,4		316,80		6399,36
		ФОТ							316,80		6399,36

		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			174,24		4159,58	
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			101,38		2559,74	
		Всего по позиции							592,42		13118,68	
3 5	ТЕРп-01-11- 028-01	Измерение сопротивления изоляции мегаомметром кабельных и других линий напряжением до 1 кВ, предназначен ных для передачи электроэнергии к распределитель ным устройствам, щитам, шкафам, коммутационн ым аппаратам и электропотребит елям	линия	5	1	5						
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2										
	1	ОТ						7,77	1	38,85	20,2	784,75
	2	ЭМ							1			
	3	в т.ч. ОТм							1			
	4	М							1			
		ЗТ	чел.-ч	0,32	1	1,6						
		ЗТм	чел.-ч		1							
		Итого по расценке							7,77		38,85	784,75
		ФОТ								38,85		784,75
		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			21,37		510,09	
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			12,43		313,90	
		Всего по позиции							72,65		1608,74	
3 6	ТЕРп-01-03- 002-05	Выключатель трехполюсный напряжением до 1 кВ с электромагнит ным, тепловым или комбинированн ым расцепителем, номинальный ток до 200 А	шт	4	1	4						
	Инд_ЛЮ2014_05 _2024	Козп=20,2										

	1	ОТ				48,09	1	192,36	20,2	3885,68	
	2	ЭМ					1				
	3	в т.ч. ОТм					1				
	4	М					1				
		ЗТ	чел.-ч	2,7	1	10,8					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке				48,09			192,36	20,2	3885,68
		ФОТ						192,36		3885,68	
		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55		105,80		2525,69	
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32		61,56		1554,27	
		Всего по позиции						359,72		7965,64	
3	7	ТЕРп-01-11-022-01	Измерение активного, индуктивного сопротивлений и емкости электрических машин и аппаратов	измерение	6	1	6				
		Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2								
	1	ОТ					9,71	1	58,26	20,2	1176,84
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	0,4	1	2,4					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке				9,71			58,26	20,2	1176,84
		ФОТ						58,26		1176,84	
		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55		32,04		764,95	
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32		18,64		470,74	
		Всего по позиции						108,94		2412,53	
3	8	ТЕРп-01-11-013-01	Замер полного сопротивления цепи «фаза- нуль»	токоприемник	3	1	3				
		Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2								
	1	ОТ					29,62	1	88,86	20,2	1794,96
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	1,22	1	3,66					

		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					29,62		88,86		1794,96
		ФОТ						88,86		1794,96	
		НР (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55		48,87		1166,72	
		СП (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32		28,44		717,98	
		Всего по позиции							166,17		3679,66
39	ТЕРп-01-11-011-01	Проверка наличия цепи между заземлителями и заземленными элементами	100гочек	0,13	1	0,13					
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					314,6	1	40,90	20,2	826,14
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	12,96	1	1,6848					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					314,6		40,90		826,14
		ФОТ						40,90		826,14	
		НР (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55		22,50		536,99	
		СП (48 Пусконаладочные работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32		13,09		330,46	
		Всего по позиции							76,49		1693,59
40	ТЕРп-01-06-021-01	Схема разводки трехпроводной системы с количеством панелей (шкафов, ячеек) до 2	схема	2	1	2					
	Инд_ЛЮ2014_05_2024	Козп=20,2									
	1	ОТ					62,6	1	125,20	20,2	2529,04
	2	ЭМ						1			
	3	в т.ч. ОТм						1			
	4	М						1			
		ЗТ	чел.-ч	2,88	1	5,76					
		ЗТм	чел.-ч		1						
		Итого по расценке					62,6		125,20		2529,04
		ФОТ						125,20		2529,04	

		НР (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: НР = 65%*0,85 = 55% Тек. итоги: НР = 65% = 65%	%		1	55			68,86		1643,88
		СП (48 Пусконаладочны е работы) Баз. итоги: СП = 40%*0,8 = 32% Тек. итоги: СП = 40% = 40%	%		1	32			40,06		1011,62
		Всего по позиции							234,12		5184,54

		Всего									
		Прямые затраты							2155,04		43531,7 3
		оплата труда							2155,04		43531,7 3
		Итого ФОТ							2215,48		44974,8 1
		Итого накладные расходы							1185,27		28295,6 3
		Итого сметная прибыль							689,63		17412,6 8
		Итого СМР							4029,94		89240,0 4
		Итого по разделу сметная стоимость							4029,94		89240,0 4

Материалы по ССЦ

4 1	201-8247 ТССЦ_ЛО2014_ 05_2024	Полотна калиток сечтчатые из плетеной сетки S=1,25x2,07=2,5 9 м2, КМ 5В (серия 3.017-1)	шт	1	1	1	6120,4 3	1	555,28	11,02	6120,43
		Всего по позиции							555,28		6120,43
4 2	101-2548 ТССЦ_ЛО2014_ 05_2024	Сталь полосовая 40x4 мм Объем: 40 * 1.26 : 1000	т	0,0504	1	0,0504	67520, 61	1	259,32	13,12	3403,04
		Всего по позиции							259,32		3403,04
4 3	101-1641 ТССЦ_ЛО2014_ 05_2024	Сталь угловая равнополочная, марка стали ВСт3кп2, размером 50x50x5 мм Объем: 3.77 * 16 : 1000	т	0,0603 2	1	0,0603	61145, 61	1	303,47	12,15	3687,08
		Всего по позиции							303,47		3687,08
4 4	101-2544 ТССЦ_ЛО2014_ 05_2024	Сталь угловая 63x63 мм Объем: 14 * 1.5 * 4.81 : 1000	т	0,1010 1	1	0,101	59233, 11	1	471,52	12,69	5982,54
		Всего по позиции							471,52		5982,54
4 5	403-8008 ТССЦ_ЛО2014_ 05_2024	Блоки бетонные стен подвалов сплошные (ГОСТ13579-78) ФБС12-4-6-Т /бетон В7,5 (М100), объем 0,265 м3, расход арматуры 1,46 кг/	шт	3	1	3	2743,8 3	1	439,20	18,74	8231,49
		Всего по позиции							439,2		8231,49
4 6	403-8002 ТССЦ_ЛО2014_ 05_2024	Блоки бетонные стен подвалов сплошные (ГОСТ13579-78) ФБС9-4-6-Т /бетон В7,5 (М100), объем 0,195 м3, расход	шт	7	1	7	2274,2 5	1	754,04	21,11	15919,75

		арматуры 0,76 кг/									
		Всего по позиции						754,04			15919,75
4 7	103-0137 ТССЦ_ЛЮ2014_ 05_2024	Трубы стальные электросварные прямошовные со снятой фаской из стали марок БСт2кп-БСт4кп и БСт2пс- БСт4пс наружный диаметр 57 мм, толщина стенки 2,5 мм Объем: 2.2 * 10	м	22	1	22	211,78	1	451,88	10,31	4659,16
		Всего по позиции						451,88			4659,16
4 8	401-0241 ТССЦ_ЛЮ2014_ 05_2024	Бетон мелкозернистый, класс В3,5 (М50) Объем: 0.1 * 10	м3	1	1	1	6273,8 5	1	476,82	13,16	6273,85
		Всего по позиции						476,82			6273,85
4 9	201-8225 ТССЦ_ЛЮ2014_ 05_2024	Панели оград сеччатые из сварной сетки S = 2,75 x 1,56=4,29 м2, ПМ 5 (серия 3.017-1)	шт	9	1	9	2210,2 5	1	1801,08	11,04	19892,25
		Всего по позиции						1801,08			19892,25

		Всего									
		Прямые затраты							5512,61		74169,5 9
		материальные ресурсы							5512,61		74169,5 9
		Итого СМР							5512,61		74169,5 9
		Итого по разделу сметная стоимость							5512,61		74169,5 9

		Всего									
		Прямые затраты							169186, 97		126565 2,69
		оплата труда							5892,99		118530, 53
		эксплуатация машин							3543,07		40880,5 4
		в т.ч. оплата труда машинистов							488,51		9867,68
		материальные ресурсы							8584,37		110054, 12
		в т.ч. материалы учтенные в расценках							3071,76		35884,5 3
		в т.ч. неучтенные материалы							5512,61		74169,5 9
		Итого ФОТ							6627,98		134254, 24
		Итого накладные расходы							4833,33		114823, 55
		Итого сметная прибыль							2926,77		73899,7 4
		Итого СМР							25780,5 3		458188, 48
		Итого оборудование							151166, 54		996187, 50
		Итого сметная стоимость							176947, 07		145437 5,98
	МС РФ от 19.06.2020 №332/пр, п.50.	Временные здания и сооружения								2,5 %	11454,7 1

		Итого с ВЗиС			469643, 19
	МС РФ от 25.05.2021 №325/пр, п.85.	Зимнее удорожание		2,1 %	9862,51
		Итого с зимним удорожанием			479505, 70
		Итого с оборудованием			147569 3,20
	МС РФ от 04.08.2020 №421/пр	Непредвиденные работы и затраты		3 %	44270,8 0
		Итого без НДС			151996 4
	НК РФ ч.2 Глава 21 от 05.08.2000 №117-ФЗ	НДС		20 %	303992, 81
		ИТОГО			182395 6,81