

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – Пушкин

2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

Научный руководитель:	Косоухов Федор Дмитриевич , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики и электрооборудования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»
Официальные оппоненты:	Смоловик Сергей Владимирович , доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-технического отдела АО «НТЦ ЕЭС», действительный член Академии электротехнических наук РФ. Рощин Олег Алексеевич , кандидат технических наук, ведущий специалист Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина» (ФГБОУ ВО Орловский ГАУ)

Защита состоится «05» декабря 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.033.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» по адресу: 196601, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, лит А. ауд. 2113. Тел. +7(812)470-04-22, e-mail: ds431_2@spbgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://spbgau.ru> ФГБОУ ВО СПбГАУ. Объявление о защите и автореферат размещены на сайтах <https://spbgau.ru> ФГБОУ ВО СПбГАУ и <https://vak.minobrnauki.gov.ru> ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.033.02
доктор технических наук, профессор

Огнев Олег Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (ТП).

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. Существенным её недостатком является малая мощность этой системы электропередачи – 20 кВт.

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

В рассматриваемой системе электропередачи электрическая энергия от трёхфазного источника преобразуется с помощью трансформаторного преобразователя числа фаз 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 трёхфазного тока с понижением напряжения до необходимого уровня. Таким образом, фазообразующими элементами в данной системе электропередачи является обыкновенный трёхфазный трансформатор со специальной схемой соединения обмоток и две конденсаторные батареи, которые, одновременно с фазообразованием, 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. Смолвик, 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 $\cos \varphi$ 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 фазопреобразующих 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 фазопреобразующих 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 сбытовых и сетевых компаниях о чём имеются соответствующие акты о внедрении.

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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, изложенная в автореферате.

В первой главе «Неполнофазные электроэнергетические системы» изложены системы содержащие двухпроводные и однопроводные высоковольтные линии.

К таким системам относятся:

1. Двухпроводная система электропередачи В.А. Терехина.
2. Вставка постоянного тока в трехфазную систему электропередачи, разработка НИИ Постоянного тока.
3. Резонансная однопроводная система передачи и распределения электроэнергии, основанная на работах Н. Тесла. Выполнена в государственном научном учреждении Всероссийском научно-исследовательском институте электрификации сельского хозяйства (ГНУ 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.

Двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз является изобретением СПбГАУ, на которое получен патент № 2532534. Эта система выполнена на базе типовых электротехнических устройств, простая по конструкции и надежная в эксплуатации. Принято решение провести полные теоретические и экспериментальные исследования этой системы.

Во второй главе «Теоретические исследования трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1» приведен анализ трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-1 с конденсаторами на низкой стороне повышающего трансформатора.

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

К задачам анализа ТПЧФ-1 относятся:

1. Установление зависимостей изменения емкостей 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. Составление баланса мощностей.

Допущения принятые при анализе ТПЧФ-1:

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

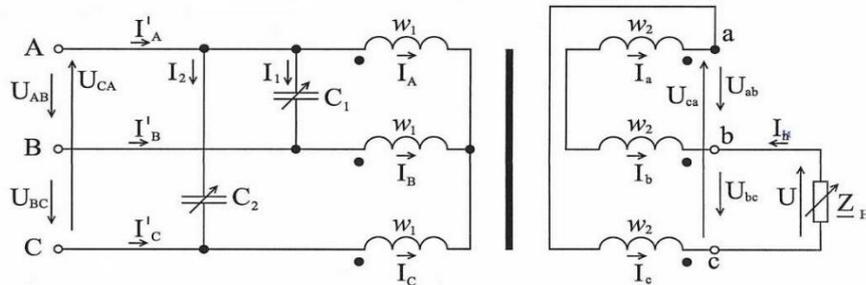


Рисунок 1 – Схема ТПЧФ-1 с конденсаторами на низкой стороне трансформатора

$$\underline{n} = \frac{U_A}{U_a} = \frac{U_B}{U_b} = \frac{U_C}{U_c} = ne^{j180^\circ} = -n, \quad (1)$$

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.

2. Потерями в конденсаторных батареях пренебрегаем, т.е.:

$$\underline{Z}_1 = -jx_1 = x_1 e^{-j90^\circ}; \quad (2)$$

$$\underline{Z}_2 = -jx_2 = x_2 e^{-j90^\circ}. \quad (3)$$

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

$$\underline{Z}_H = R_H + jx_H = Z_H e^{j\varphi_H}. \quad (4)$$

4. Трёхфазная система напряжений на входе трансформатора симметрична. Направив по вещественной оси вектор фазного напряжения $\underline{U}_A = U_\phi$, запишем комплексы фазных напряжений первичной обмотки трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= U_\phi; \\ \underline{U}_B &= U_\phi e^{j\frac{4\pi}{3}} = \underline{a}^2 U_\phi; \\ \underline{U}_C &= U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}} = \underline{a} U_\phi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Учитывая принятые допущения, ёмкости конденсаторных батарей C_1 и C_2 будут равны:

$$C_1 = \frac{1}{\omega x_1} = \frac{8 \cos \varphi}{\omega 3\sqrt{3}n^2 Z_H} = \frac{8 I_H \cos \varphi}{3\sqrt{3}n^2 \omega U}; \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega x_2} = \frac{8 \sin(30^\circ + \varphi)}{\omega 3\sqrt{3}n^2 Z_H} = \frac{8 I_H \sin(30^\circ + \varphi)}{3\sqrt{3}n^2 \omega U}. \quad (7)$$

Из выражений (6), (7) 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 емкостной характер, т.е. преобразование трехфазного тока в однофазный осуществляется с помощью ТПЧФ-1 в широком диапазоне изменения нагрузки. На рисунке 2 представлен график зависимости емкости C_1 ТПЧФ-1 от тока линии при $n = 1,0$, а на рисунке 3 – график зависимости емкостей C_1 и C_2 ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{\text{ном}}$.

Токи ТПЧФ-1

Система токов трехфазного источника:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}'_A &= \frac{2I_H}{3n} \{-\cos \varphi + j[2 \cos(30^\circ - \varphi) + \sin \varphi]\}; \\ \underline{I}'_B &= \frac{2I_H}{3n} [2 \cos \varphi + \sqrt{3} \sin \varphi - j \sin \varphi]; \\ \underline{I}'_C &= -\frac{2I_H}{3n} 2[\sin(30^\circ + \varphi) + j \cos(30^\circ - \varphi)]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

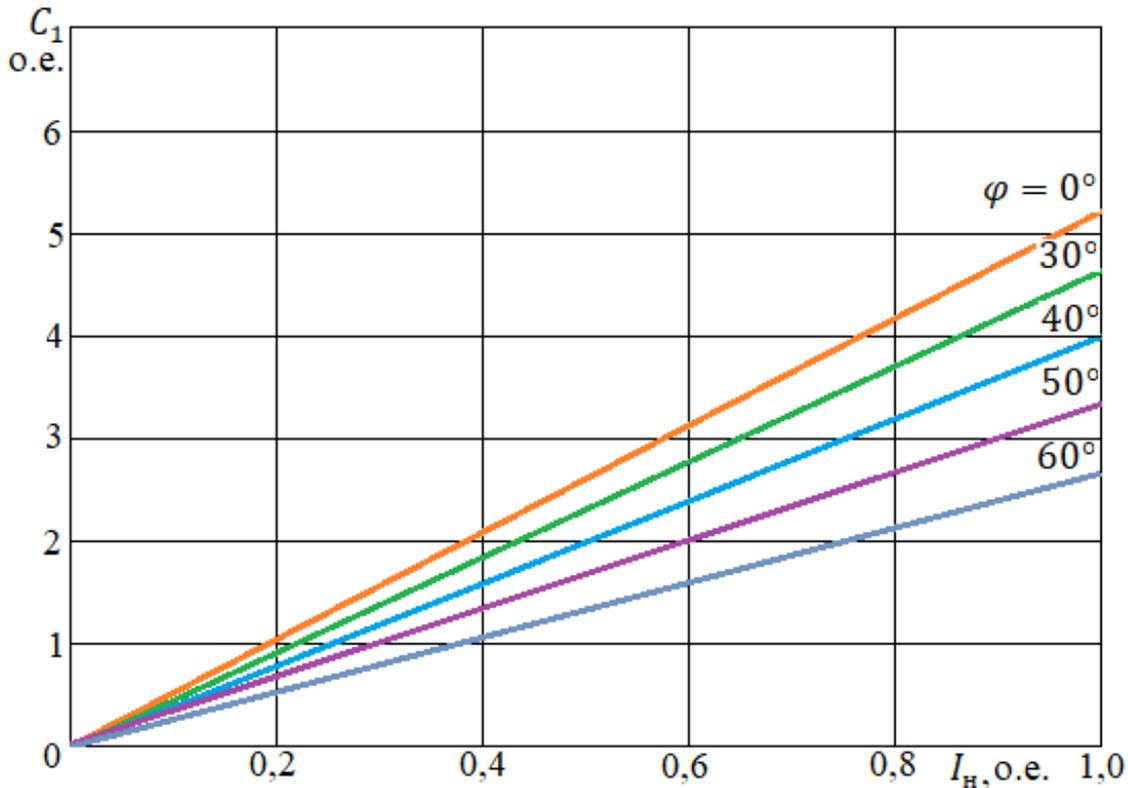


Рисунок 2 – Зависимости емкости ТПЧФ-1 C_1 от тока линии при $n = 1,0$.

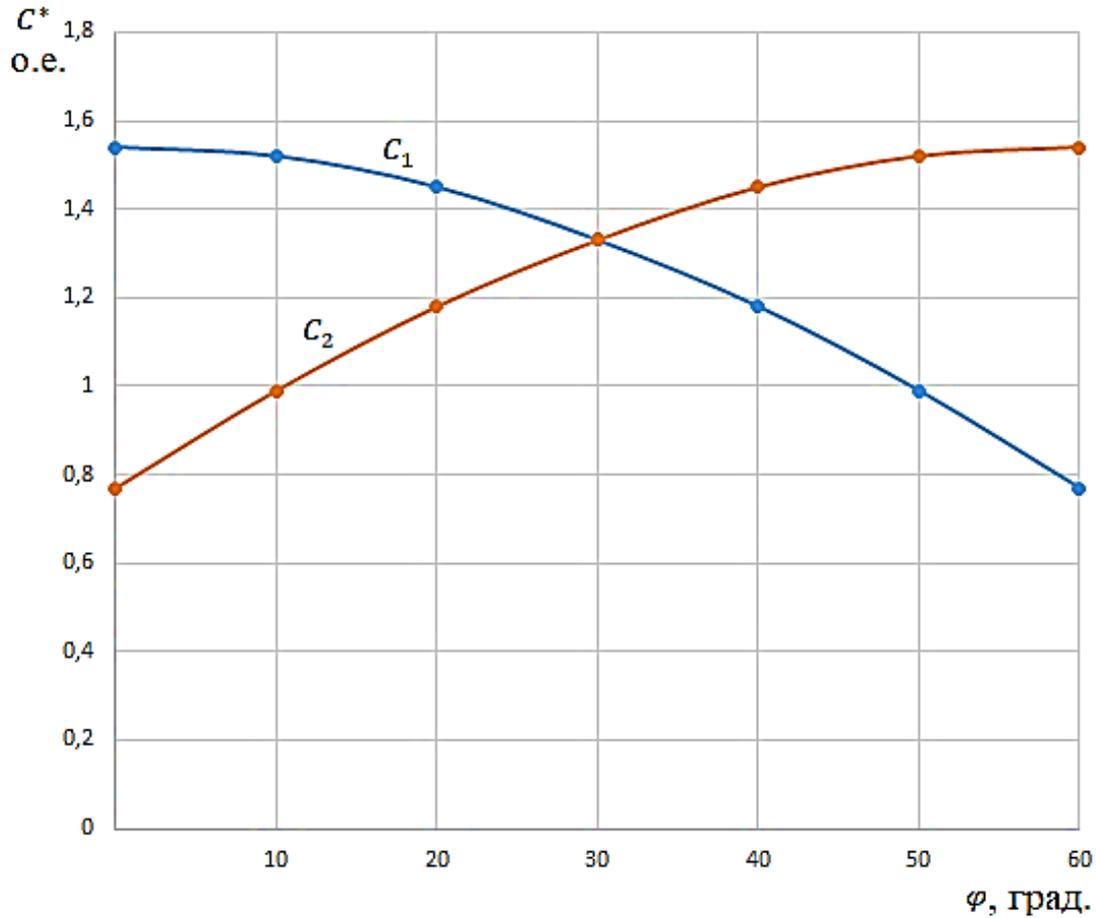


Рисунок 3 – Зависимости емкостей ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$,
 $I_H = I_{\text{НОМ}}$

Токи симметрирующих элементов:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{4I_H \cos \varphi e^{j120^\circ}}{3n}; \\ \underline{I}_2 &= \frac{4I_H \sin(30^\circ + \varphi) e^{j60^\circ}}{3n}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Токи первичных обмоток трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= -\frac{2I_H}{3n} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \\ \underline{I}_B &= \frac{2I_H}{3n} 2[\sin(30^\circ + \varphi) - j\cos(30^\circ + \varphi)]; \\ \underline{I}_C &= -\frac{2I_H}{3n} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Ток вторичных обмоток трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_c = I_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]; \\ \underline{I}_b &= -\underline{I}_a = -I_H [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ток однофазной нагрузки:

$$\underline{I}_H = \frac{2U_\Phi}{nZ_H} [\sin(30^\circ + \varphi) + j\cos(30^\circ + \varphi)]. \quad (12)$$

По формулам (8) – (12) на рисунке 4 построены зависимости токов ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки.

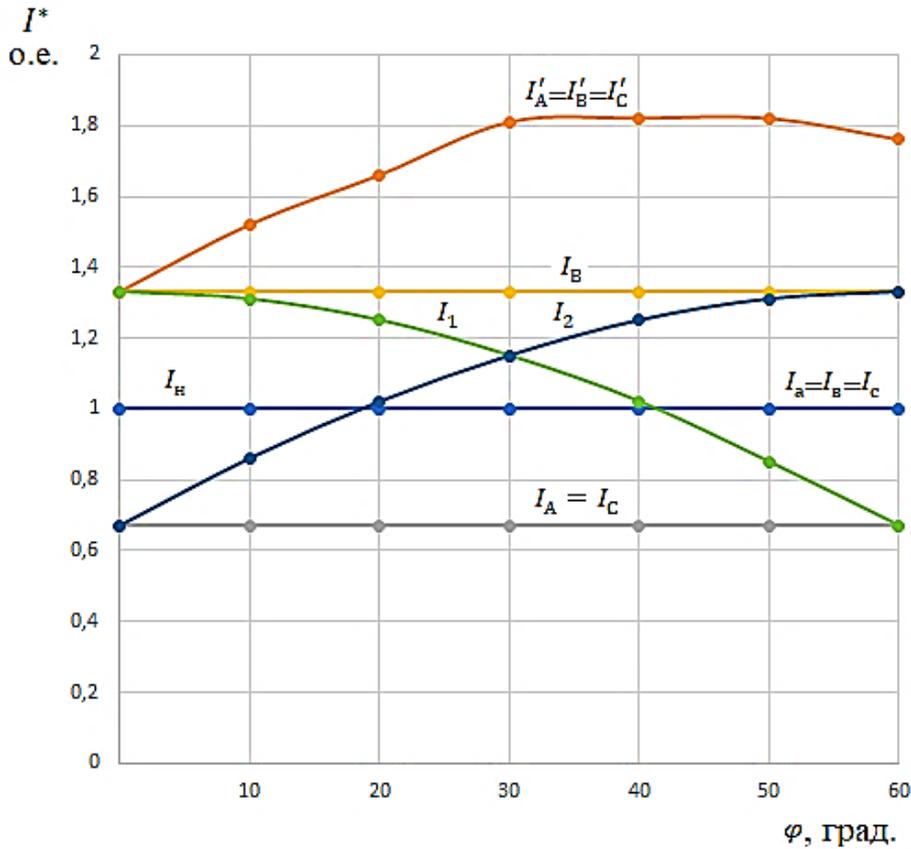


Рисунок 4 – Зависимости токов ТПЧФ-1 от угла φ нагрузки при $n = 1,0$, $I_H = I_{НОМ}$
Напряжения ТПЧФ-1

Напряжения на первичных обмотках трансформатора ТПЧФ-1 приведены в (5).

Напряжения на вторичных обмотках повышающего трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \frac{U_A}{\underline{n}} = \frac{U_A}{-n} = -\frac{U_A}{n} = \frac{U_\Phi}{n} e^{-j180^\circ}; \\ \underline{U}_B &= \frac{U_B}{\underline{n}} = \frac{U_\Phi}{n} e^{j\frac{4\pi}{3}} e^{-j180^\circ} = \frac{U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}; \\ \underline{U}_C &= \frac{U_C}{\underline{n}} = \frac{U_\Phi}{n} e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{-j180^\circ} = \frac{U_\Phi}{n} e^{-j60^\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Напряжения на конденсаторных батареях:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_\Phi(1 - \underline{a}^2) = U_\Phi \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= \frac{U_\Phi}{2} (3 + j\sqrt{3}) = \frac{U_\Phi}{2} 3,464 e^{j30^\circ} = \sqrt{3} U_\Phi e^{j30^\circ}. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= -\underline{U}_{CA} = -(\underline{U}_C - \underline{U}_A) = -(a U_\Phi - U_\Phi) = U_\Phi(1 - a) = \\ &= U_\Phi \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{U_\Phi}{2} (3 - j\sqrt{3}) = \frac{U_\Phi}{2} 3,464 e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} U_\Phi e^{-j30^\circ}. \end{aligned} \quad (15)$$

Напряжение однофазной нагрузки:

$$\begin{aligned}
 \underline{U} &= \underline{U}_B - \underline{U}_A - \underline{U}_C = \frac{U_\Phi}{n} [e^{j60^\circ} - e^{-j180^\circ} - e^{-j60^\circ}] = \\
 &= \frac{U_\Phi}{n} [\cos 60^\circ + j \sin 60^\circ + 1 - \cos 60^\circ + j \sin 60^\circ] = \\
 &= \frac{U_\Phi}{n} [j2 \sin 60^\circ + 1] = \frac{U_\Phi}{n} \left[j2 \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right] = \frac{U_\Phi}{n} (j\sqrt{3} + 1) = \frac{2U_\Phi}{n} e^{j60^\circ}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

В третьей главе «Анализ трансформаторного преобразователя числа фаз ТПЧФ-2 с фазопреобразующими элементами на низкой стороне трансформатора» выполнен анализ ТПЧФ-2 с конденсаторами на низкой стороне понижающего трансформатора. В связи с тем, что во второй главе подробно изложена методика анализа ТПЧФ-1 с конденсаторами на низкой стороне повышающего трансформатора (а эти методики одинаковы) и дефицита объема автореферата, анализ ТПЧФ-2 представлен в третьей главе диссертации.

В четвёртой главе «Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи» дано описание экспериментальной установки, приведены результаты экспериментального исследования двухпроводной системы электропередачи 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).

На электрической схеме установки (рисунок 5) изображена схема ТПЧФ-1 с конденсаторными фазопреобразующими элементами C_1 и C_2 на низкой стороне повышающего трансформатора ТС-1. Для измерения напряжений, токов, активной, реактивной и полной мощности, а также значений ёмкостей C_1 и C_2 предназначены измерительные устройства «Энергомонитор 3.3» №1 и №2.

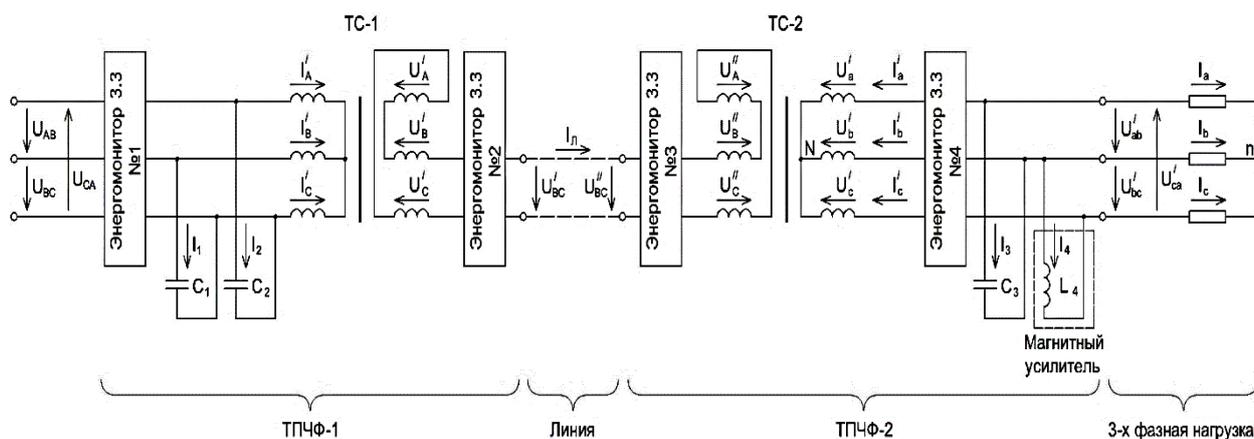


Рисунок 5 – Схема установки для исследования двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз

К выходным зажимам ТПЧФ-1 подключена двухпроводная линия, длиной 370 м выполненная проводом марки СИП-4 сечением 25 мм². Концы линии через «Энергомонитор 3.3» №3 подключены к зажимам первичной обмотки понижающего трансформатора ТС-2 с фазообразующими элементами – ёмкостью С₃ и индуктивностью L₄. К выходным зажимам трансформатора ТС-2 подключён «Энергомонитор 3.3» №4, и далее подключено трёхфазное нагрузочное устройство.

Сравнение двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз и трёхфазной трёхпроводной системы электропередачи

Определим потери мощности в электрооборудовании двухпроводной и трёхпроводной систем электропередачи по результатам измерения активных мощностей (таблица 1).

Потери мощности в ТПЧФ и трансформаторе ТС-1:

$$\Delta P_1 = P_{\text{вх1}} - P_{\text{вых1}}. \quad (17)$$

Потери мощности в ТПЧФ и трансформаторе ТС-2:

$$\Delta P_2 = P_{\text{вх2}} - P_{\text{вых2}}. \quad (18)$$

Потери мощности в двухпроводной (трёхпроводной) линии:

$$\Delta P_{\text{л}} = P_{\text{вых1}} - P_{\text{вх2}}. \quad (19)$$

Таблица 1 - 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 _{вх1}	P _{вх1}	773,5	1326	2165	2607	2896
Выход ТПЧФ-1	P _{вых1}	Вт	734,4	1246,5	1984,8	2335,9	2560
Вход ТПЧФ-2	P _{вх2}	Вт	720,6	1204,9	1877	2193	2383,5
Выход ТПЧФ-2	P _{вых2}	Вт	640,6	1077	1630	1855	1979
Потери ТПЧФ-1	ΔP ₁	Вт	39,1	86,1	180,2	271,1	336
Потери ТПЧФ-2	ΔP ₂	Вт	80	127,9	247	338	404,5
Потери в линии	ΔP _л	Вт	13,8	41,6	107,8	142,9	176,5
Суммарные потери	ΣΔP	Вт	132,9	255,6	535	752	917
Мощность трёхфазной нагрузки	P _{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

Место установки Энергомонитора	Изм. вел.	Ед. изм.	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Потери напряжения в двухпроводной проводной линии	$\Delta U_{Л}$	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 1 приведены расчетные и опытные значения параметров фазопреобразующих элементов ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 и их расхождения. Сравнение опытных данных с расчетными показывает, что максимальное расхождение составляет 8 %. Следовательно, формулы расчета параметров фазопреобразующих элементов ТПЧФ-1 и ТПЧФ-2 правильные.

В пятой главе «Технико-экономическое обоснование вариантов электроснабжения удаленных от источников электроэнергии объектов АПК» рассмотрены два варианта электроснабжения объекта.

Объект АПК удален 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. Номинальная полная мощность объекта электроснабжения:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{80}{0,8} = 100 \text{ кВА.} \quad (20)$$

Источником питания для объекта АПК является установка ВИЭ (мини ГЭС) напряжение на выходе генератора 400В.

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 трехфазная трехпроводная выполнена защищенными проводами марки СИП-3 сечением 70 мм².

Высоковольтная линия ВЛ 11 кВ во втором варианте двухпроводная выполнена проводами марки СИП-2 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 трехпроводная, 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.

Если учесть, что в первом варианте тоже необходима компенсация реактивной мощности нагрузки, то на трансформаторной подстанции следует установить конденсаторные батареи.

Таким образом, трансформаторные подстанции по первому и второму вариантам с точки зрения капитальных затрат будут отличаться на разницу стоимости силовых трансформаторов, стоимости конденсаторных установок, арматуры (изоляторов, креплений) ВЛ и разницу капитальных затрат на строительство ВЛ 10 (11) кВ протяженностью 10 км:

по первому варианту – трехпроводная ВЛ 10 кВ;

по второму варианту – двухпроводная ВЛ 11 кВ.

Расчет сметной стоимости строительства ВЛ 10 (11) кВ приведен в таблице 2.

Таблица 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 вариантам	1,47	

Из таблицы 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.

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 и трёхпроводных 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 трёхпроводной 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 трёхпроводными 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Борошнин А. Л. Симметрирование однофазных нагрузок в сельских электрических сетях [Текст] / Ф. Д. Косоухов, А. О. Филиппов, Н. В. Васильев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – №2. – С. 9-12.
2. Борошнин А. Л. Энергосбережение при транспортировке электрической энергии по линиям 0,38 кВ при несимметричной нагрузке [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов, А. О. Горбунов // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. – 2017. – №5(44). – С. 64-71.
3. Борошнин А. Л. Расчёт потерь электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Г. Гушинский, М. В. Коломыцев, А. О. Горбунов // Энергоэксперт. – 2018. – №2(66). – С. 27-30.
4. Борошнин А. Л. Совершенствование систем электроснабжения, удалённых от источников электроэнергии объектов АПК, с помощью двухпроводных систем с трансформаторными преобразователями числа фаз [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин, Н. Ю. Криштопа, М. Ю. Теремецкий // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – №41-1. – С. 109-116.
5. Борошнин А. Л. Двухпроводная система электропередачи трёхфазного тока [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин, А. О. Филиппов, А. О. Горбунов, М. Ю. Теремецкий // Электричество. – 2018. – №10. – С. 37-44. DOI:10.24160/0013-5380-2018-10-37-44
6. Борошнин А. Л. Экспериментальное исследование двухпроводной системы электропередачи трёхфазного тока с трансформаторными преобразователями числа фаз [Текст] / Ф. Д. Косоухов, М. Ю. Теремецкий, А. Л. Борошнин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – №56. – С. 133-145. DOI:10.24411/2078-1318-2019-13133
7. Борошнин А. Л. Двухпроводная система электропередачи с трансформаторными преобразователями числа фаз для электроснабжения удаленных от источников электроэнергии объектов АПК [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. Ю. Криштопа, А. Л. Борошнин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2020. – №58. – С. 154-166. DOI:10.24411/2078-1318-2020-11154
8. Борошнин А. Л. Критерии потерь мощности от несимметричных токов в трехфазных трансформаторах и четырехпроводных линиях [Текст] / Ф. Д. Косоухов, А. П. Елифанов, Н. В. Васильев Н. Ю. Криштопа, А. О.

Горбунов, А. Л. Борошнин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. – 2023. – №6(81). – С. 64-72.

Патенты и свидетельства

9. Устройство передачи электрической энергии трехфазного тока по двухпроводной линии [Текст]: патент на изобретение RU 2532534 РФ: МПК H02J 3/04 (2006.01) / Ф. Д. Косоухов, А. О. Филиппов, Н. В. Васильев, А. Л. Борошнин // Заявка №2012153043/07 от 07.12.2012. Опубликовано 10.11.2014. Бюл. № 31.

В монографиях

10. Борошнин А.Л. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов, Н. Ю. Криштопа, Е. С. Кузнецова // Санкт-Петербург - Москва - Краснодар, Издательство «Лань» – 2016. – 276 с. ISBN 978-5-8114-2119-0

В сборниках трудов конференций

11. Борошнин А.Л. Измерение симметричных составляющих напряжений и токов в трехфазной электрической сети [Текст] / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов, Н. Ю. Криштопа // В сборнике: Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 170-176.

12. Boroshnin A. L. 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, N. Y. Krishtopa // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production" 2021. С. 012112.