

На правах рукописи



**МЕДНОВ Антон Александрович**

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА  
БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» на кафедре электромеханики

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
**Рогинская Любовь Эммануиловна**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**Щуров Николай Иванович**  
заведующий кафедрой  
«Электротехнические комплексы»  
ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический  
университет»

кандидат технических наук  
**Сизякин Алексей Вячеславович**  
доцент кафедры «Электротехнические  
комплексы автономных объектов и  
электрический транспорт (ЭКАО и ЭТ)»  
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск

Защита диссертации состоится 15 декабря 2023 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г.Уфа, ул. К. Маркса, д.12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте [www.uust.ru](http://www.uust.ru).

Автореферат разослан

«    »

2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Ямалов И.И.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Преобразователи параметров электроэнергии обеспечивают питанием ряд электротехнологических установок, в том числе включающих индукционный нагрев (ЭТУИН). Разнообразие характеристик источников питания определяет широкий спектр сфер применения ЭТУИН – закалка, пайка, плавка, сварка, нагрев и др. Несмотря на многочисленные преимущества индукционного нагрева над прочими видами нагрева в части скорости прогрева, независимости от структуры, окружающей объект воздействия, среды, экологичности, удобства управления температурой и мощностью и др, остаются нерешенными задачи снижения влияния преобразователей параметров электроэнергии на питающую сеть, обеспечения многофункциональными трансформаторами (выпрямительным трансформатором в составе трансформаторно-выпрямительного устройства (ТВУ) и ферромагнитным умножителем частоты (УЧФ)) согласования источника питания с сетью и с нагрузочным устройством по ключевым электрическим параметрам, таким как ток и напряжение. Питание ЭТУИН – процесс, сопряженный с многоступенчатым преобразованием электроэнергии, на каждом из которых наблюдаются потери, снижающие эффективность преобразования и КПД электроустановки в целом. Поэтому исследования и разработки в области электротехнических комплексов востребованы в промышленности и актуальны для науки.

**Степень разработанности темы.** Работа над вопросами повышения энергоэффективности, улучшения электромагнитной совместимости, расширения функциональных возможностей, в том числе и увеличения диапазона рабочих частот, полупроводниковых преобразователей велась и ведется следующими учеными: А.М. Бамдас, Е.И. Беркович, Ю.М. Голембиовский, С.В. Дзалиев, Г.С. Зиновьев, Ю.Н. Казанцев, А.В. Осипов, Л.Э. Рогинская, С.В. Шапиро, В. Diong, N. Marham, L. Markegard и др.

Компании-производители индукционных установок: «UltraFlex power technologies» (США), ROBOTERM (Чехия), Heatking (Канада), EGES (Турция), ООО ТД «Мосиндуктор» (г.Москва), ООО НПП «Курай», АО ТД «Электротехнология» (г. Екатеринбург), АО «РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург) и др.

**Цели и задачи.** Цель работы – совершенствование характеристик преобразователей параметров электроэнергии для ЭТУИН для улучшения согласования их с сетью и нагрузкой и повышения энергоэффективности для случая каскадного соединения многофункциональных трансформаторов (МТ) и полупроводниковых преобразователей.

Достижение поставленной цели возможно путем решения ряда задач:

1. Разработка схемных решений источников питания, включающих каскадное соединение высокоэффективных многофункциональных и полупроводниковых преобразователей электроэнергии.

2. Анализ существующих конструктивных особенностей входных выпрямительных трансформаторов и формирование на его основе энергоэффективных компоновочных решений.

3. Разработка математической и имитационной модели МТ для исследования электромагнитных процессов в данных преобразователях и моделирования режимов работы реальных устройств.

4. Экспериментальное обоснование теоретических положений об улучшении характеристик преобразователей параметров электроэнергии ЭТУИН на основе разработанной компоновочной схемы ТВУ с входящим в него трансформатором с гибридным магнитопроводом, состоящим из комбинации материалов, обладающих различными магнитными свойствами.

**Научная новизна** темы диссертационного исследования:

1. Определены схемные решения, улучшающие функциональное состояние полупроводниковых инвертирующих модулей источника питания ЭТУИН за счет снижения коммутационной нагрузки и эффективного регулирования его входных параметров.

2. Сформированы уникальные технические решения выпрямительных трансформаторов (трансформатор с гибридной магнитной системой, трансформатор с минимальным потоком рассеяния, трансформатор с вращающимся магнитным полем) и их имитационные модели, отличающиеся повышенными показателями эффективности преобразования электроэнергии.

3. Разработаны и исследованы математическая и имитационная модели магнитной системы многофункционального трансформатора, отличающиеся методом их формирования.

4. Предложена методика расчета обмоток трансформатора, отличающаяся получением минимальных значений потоков рассеяния в трансформаторе.

5. Предложена методика проектирования гибридных магнитных систем входных многообмоточных выпрямительных трансформаторов, отличающаяся подходом к определению соотношения магнитных материалов.

6. Подтверждена возможность применения гибридных магнитных систем в трансформаторах с целью улучшения их энергетических характеристик.

7. Подтверждена возможность повышения энергетической эффективности и энергоемкости гибридной магнитной системы за счет регулирования напряженности магнитного поля в магнитной цепи входного многообмоточного выпрямительного трансформатора.

**Теоретическая и практическая значимость**

1. Разработанные технические решения позволяют повысить КПД источника питания, обеспечивая простоту регулирования его входных и выходных параметров.

2. Математические и имитационные модели позволяют осуществлять синтез ключевых параметров многофункционального трансформатора и его магнитной системы, в частности.

3. Разработанные методики расчета обмоток трансформатора и гибридной магнитной системы применены в процессе инженерного проектирования.

**Методология и методы исследования** подобраны в соответствии с характером решаемых задач. Имитационное и схмотехническое моделирование выполнялось с использованием прикладных программ *Mathcad* и *ANSYS Electronics Desktop*. Адекватность выбранной методики исследования и достоверность полученных результатов подтверждается верификацией экспериментальной частью исследования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Источник питания с каскадным включением полупроводниковых преобразователей и многофункциональных трансформаторов с улучшенными

энергетическими свойствами.

2. Результаты исследования, проведенные на базе схмотехнических и имитационных моделей, подтверждающие:

– перераспределение магнитных потоков в гибридном магнитопроводе трансформатора при изменении напряженности магнитного поля;

– получение требуемых параметров при синтезе гибридной магнитной системы;

– повышение энергоэффективности и качества преобразования электроэнергии

3. Результаты эксперимента, верифицирующие результаты компьютерного моделирования.

4. Методический аппарат расчета обмотки и гибридной магнитной системы, отличающийся своей оригинальностью в отношении способа и объекта расчета соответственно.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Ключевые результаты работы доложены на международных и российских конференциях: Международная научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» ICOECS 2018, ICOECS 2019, ICOECS 2020 и ICOECS 2021 (Уфа, 2018-2021гг.), Завалишинские чтения (Санкт-Петербург, 2020г.); IV Международная научно-практическая конференция с онлайн-участием «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте (ИИТМА-2020)» (г.Кемерово, 2020г.); XIII молодежная научная конференция Тинчуринские чтения (г.Казань, 2018г.); Гагаринские чтения 2018, 2019 и 2020 (Москва, 2018 – 2020гг.); 5-я Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная профессиональному празднику "День энергетика" «Актуальные проблемы энергетики» (г.Благовещенск, 2016г.);

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 49 работ, среди которых 3 в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI, 14 статей в изданиях, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, 27 статей в других изданиях. Получено 3 патента на полезную модель и 2 патента на изобретение.

**Личный вклад.** В трудах, содержащих основные результаты диссертационного исследования и написанных в соавторстве и единолично, соискателю принадлежит: в [1,11,17,19,20] – анализ перспективных решений в области согласующих и многофункциональных трансформаторов в источниках питания ЭТУИН; в [2,4,5,8] – изготовление экспериментального образца и его испытание; в [3,9] – разработана математическая модель намагничивания магнитной системы МТ; в [6,7,16] – выполнен обзор перспективных магнитных материалов; в [10,12-15,19] – выполнено компьютерное моделирование; в [17, 18] выполнены расчеты трансформаторов и его составных частей по предложенной автором методике.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и 4 приложений. Диссертация изложена на 129 страницах машинописного текста.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность исследования, приводятся цель и задачи диссертационной работы, методы решения задач исследования. Также приведены состав и структура работы, выделены научная новизна и практическая значимость, указаны положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации сформулированы ключевые требования к преобразователям частоты для ЭТУИН: обеспечение мультичастотного нагрева, возможность регулирования или стабилизации выходных параметров источника питания, симметрирование однофазной нагрузки для работы в трехфазной сети, снижение потерь энергии, повышение энергоэффективности и КПД, обеспечение гальванической развязки электроцепей преобразователя частоты, согласование его параметров с сетью и нагрузкой, минимизация влияния на окружающее оборудование путем обеспечения электромагнитной совместимости, расширение частотного диапазона. Приведены некоторые современные варианты обеспечения указанных требований, определены их достоинства и недостатки. Поставлены цели и задачи исследования по результатам выполненного анализа.

**Во второй главе** работы уделено внимание работе полупроводниковых преобразователей частоты и многофункциональных трансформаторов при их каскадном включении в части обеспечения согласования с сетью и нагрузкой. Обоснованы преимущества применения преобразователей параметров электроэнергии по предлагаемой схеме (рисунок 1) снижением динамических потерь в полупроводниковых ключах инвертора за счет уменьшения количества коммутаций в единицу времени, либо расширением частотного диапазона, возможностью регулирования и стабилизации параметров, обеспечением согласования с нагрузкой и гальванической развязкой.

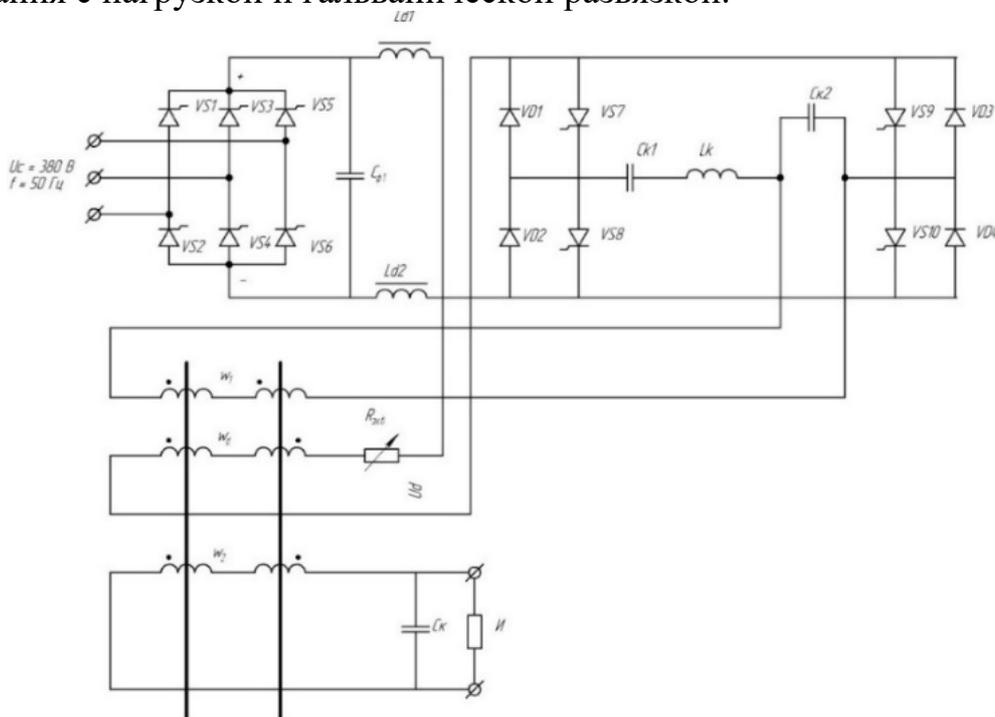


Рисунок 1 – Схема преобразователя параметров электроэнергии с УЧФ

Для магнитопроводов УЧФ на основе приближенного гармонического анализа по методу Бесселя разработаны математические модели определения амплитуд индукций второй и четвертой гармоник в относительных единицах:

– определение коэффициентов аппроксимации для стали по характеристикам индукции насыщения  $B_s$  и напряженности при индукции насыщения  $H_s$ :

$$\alpha = H_s / 200 ; \beta = 7,5 / B_s. \quad (1)$$

– вычисление индукции от второй гармоники осуществляется при делении периода на 16 равных частей и применении коэффициентов (1):

$$B_{2(v=2)} = \left(\frac{1}{8}\right) \cdot \left[ \begin{array}{l} \left( 2ash \left( \frac{H_0}{ch(\beta B_1)} \right) + \sqrt{2}ash \left( \frac{H_0}{ch \left( \beta B_1 \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) - \right. \\ \left. -\sqrt{2}ash \left( \frac{H_0}{ch \left( \beta B_1 \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) - 2ash(H_0) - \sqrt{2}ash \cdot \right. \\ \left. \cdot \left( \frac{H_0}{ch \left( -\beta B_1 \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) + \sqrt{2}ash \left( \frac{H_0}{ch \left( -\beta B_1 \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) \right] \end{array} \right], \quad (2)$$

где  $B_{2(v)}$  – амплитудное значение индукции  $v$ -ой гармонической составляющей магнитного поля.

$H_0$  – амплитудное значение напряженности магнитного поля, создаваемого обмоткой подмагничивания  $w_d$  УЧФ.

Четвертая гармоническая составляющая определяется путем аналогичного преобразования.

Нахождение индукции по второй и четвертой гармонической составляющей для режима работы с конденсатором продольной и/или поперечной емкостной компенсации также возможно на основании полученных выше выражений:

$$B_{2(v=2)} = \left( \frac{1}{8} \right) \cdot \left[ \begin{array}{l} 2ash \left( \frac{H_0 - H_2}{ch(\beta B_1)} \right) + \sqrt{2}ash \left( \frac{H_0 - \frac{\sqrt{2}H_2}{2}}{ch \left( \beta B_1 \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) - \\ - \sqrt{2}ash \left( \frac{H_0 + \frac{\sqrt{2}H_2}{2}}{ch \left( \beta B_1 \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) - 2ash (H_0 + H_2) - \sqrt{2}ash \cdot \\ \cdot \left( \frac{H_0 + \frac{\sqrt{2}H_2}{2}}{ch \left( -\beta B_1 \frac{\sqrt{2-\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) + \sqrt{2}ash \left( \frac{H_0 - \frac{\sqrt{2}H_2}{2}}{ch \left( -\beta B_1 \frac{\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} \right)} \right) \end{array} \right], \quad (3)$$

где  $H_2$  – амплитуда напряженности магнитного поля, вносимая от обмотки  $w_2$ .

С целью верификации построены графики зависимости намагничивания аморфного сплава марки 1СР построенный по (2) и по экспериментальным данным, представленные на рисунке 2. Отклонение в сопоставимых данных не более 15%.

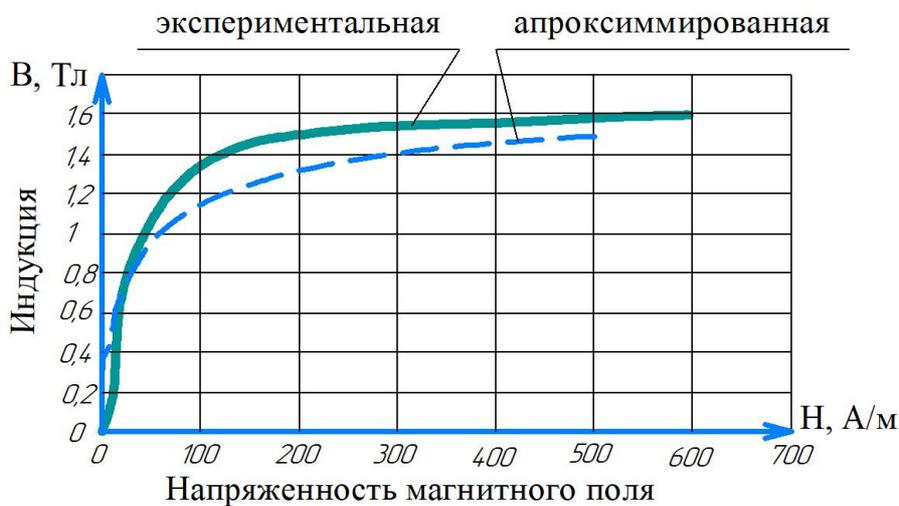


Рисунок 2 – Графики экспериментальной и аппроксимированной функции намагничивания аморфного сплава 1СР

По результатам расчетов по (2) и (3) определены характеристики намагничивания магнитопроводов УЧФ в 2 раза. Зависимости  $B_2 = f(H_0)$  и  $B_2 = f(H_0; H_2)$  показаны на рисунке 3.

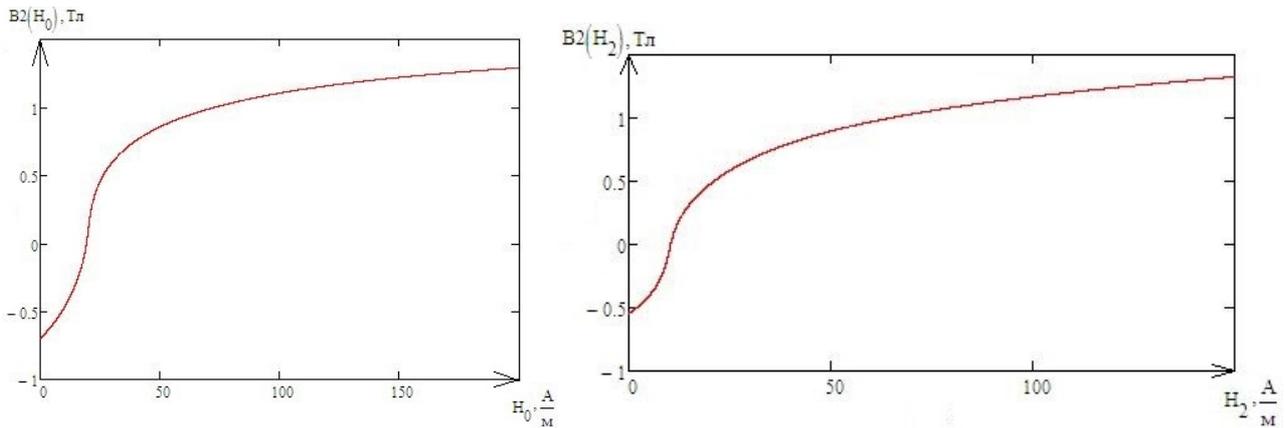


Рисунок 3 – Зависимость индукции от напряженности, вносимой обмоткой подмагничивания и вторичной обмоткой

Полученный график функции намагничивания для случая с разбиением на 16 равных частей получен с отклонением, не превышающем 15% от экспериментального графика функции.

**В третьей главе** работы представлены разработанные с целью повышения энергоэффективности решения и их оценка программными средствами.

В рамках диссертационных исследований разработан ряд перспективных гибридных магнитных систем. К таковым можно отнести магнитопровод кольцевого типа, набранный из листов различных магнитных материалов, обладающих отличающимися магнитными свойствами (рисунок 4). В изображенной на рисунке конструкции листы с материалом 1 и материалом 2 могут набираться с чередованием на технологическую оправку и склеиваться между собой клеем или свариваться, для листов с электроизоляционным покрытием. Кольцевая конструкция может быть применена при проектировании магнитных систем кольцевых трансформаторов, дросселей переменного тока, а при наличии пазов для укладки обмотки и для магнитопроводов трансформаторов с вращающимся магнитным полем.

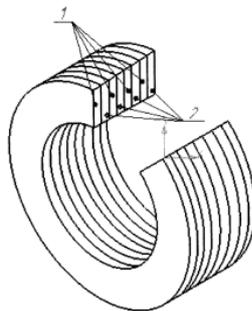


Рисунок 4 – Магнитопровод из магнитных материалов 1 и 2.

Перспективен вариант магнитной системы из лент (рисунок 5). Поочередной намоткой магнитных материалов 1 и 2 друг на друга достигается единая конструкция гибридного ленточного магнитопровода. В подобных конструкциях целесообразна для применения лента из аморфного магнитомягкого материала, обладающая низкими удельными потерями, набор в пакет которой в виду хрупкости затруднителен.

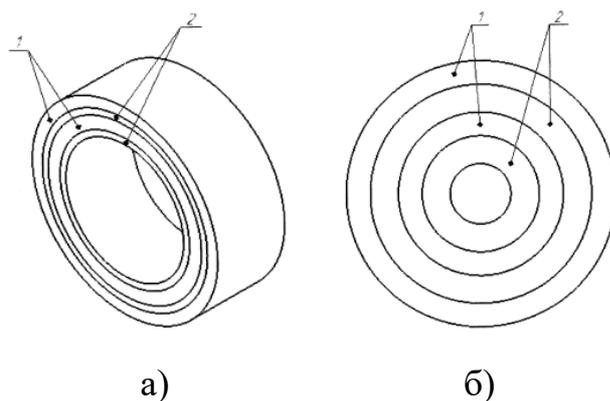


Рисунок 5 – Кольцевой ленточный гибридный магнитопровод с различным соотношением магнитных материалов по толщине а) и с одинаковой толщиной б)

Ленточный гибридный магнитопровод может быть применен и для создания трансформатора трехстержневой конструкции (рисунок 6). Для его реализации необходимо по-отдельности сформировать две одинаковые внутренние части, поверх которых намотать третью составную часть, стягивающую магнитную систему в единый магнитопровод.

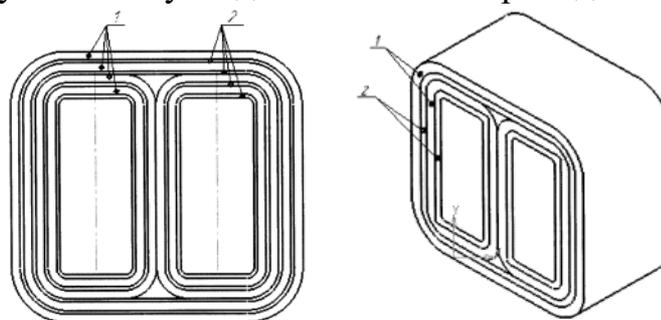


Рисунок 6 – Трехстержневой ленточный гибридный магнитопровод трансформатора

Магнитные системы больших размеров могут быть набраны из отдельных сегментов, представляющих собой склеенные между собой ленточные прямоугольные магнитопроводы с различными материалами 1 и 2 (рисунок 7).

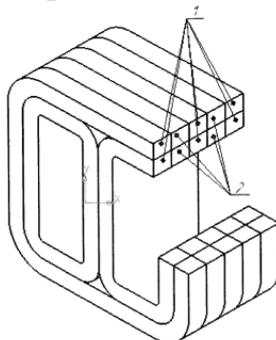


Рисунок 7 – Ленточный трехстержневой сегментированный гибридный магнитопровод трансформатора

Другим способом повышения эффективности является трансформатор с минимальным потоком рассеяния. Разработанный выпрямительный трансформатор (рисунок 8) состоит из магнитопровода 1, вторичных обмоток 2 и 3 с равными объемами, первичной обмотки 1 и изоляции между ними 5.

Упомянутый вариант трансформатора был реализован на базе гибридной магнитной системы.

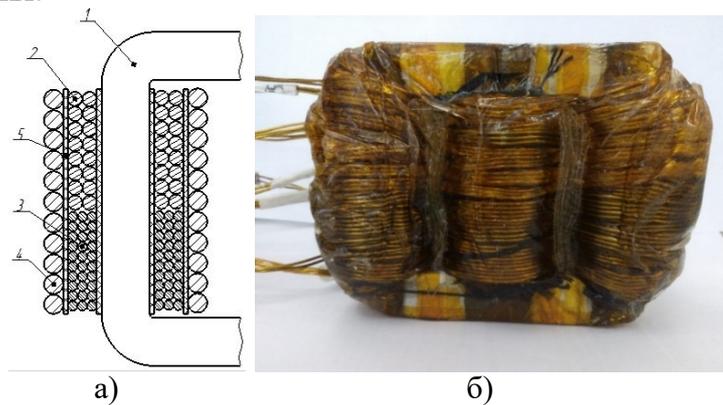


Рисунок 8 – Выпрямительный трансформатор, с минимальным потоком рассеяния

Также высокие электромагнитные характеристики показывает разработанный выпрямительный трансформатор с вращающимся магнитным полем с симметрией магнитных потоков (рисунок 9, а)). Векторная диаграмма фазных напряжений вторичных обмоток представлена на рисунке 9, б). Коэффициент пульсаций составляет  $k_{II} = 0,05$ , а максимальная индукция в магнитопроводе – 1,67 Тл.

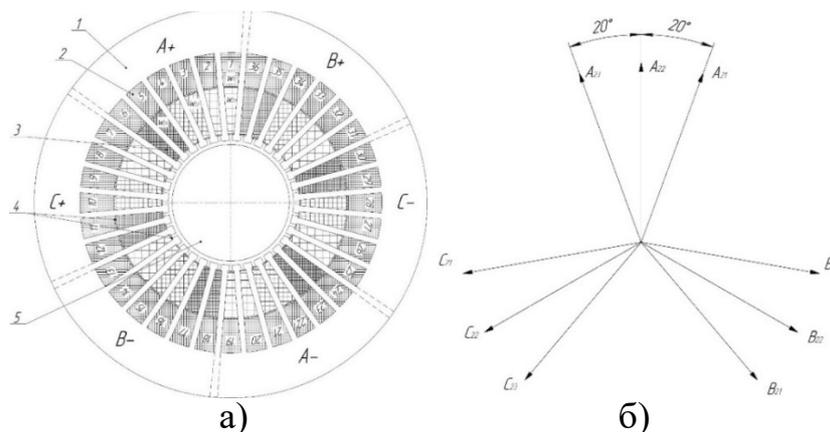


Рисунок 9 – Выпрямительный трансформатор с вращающимся магнитным полем а) и векторная диаграмма напряжений на его вторичных обмотках б)

Выполнено моделирование выпрямительного трансформатора для ТБУ мощностью 9 кВт в программном комплексе *ANSYS Electronics Desktop*. В *ANSYS Simplorer* построена схема соединения обмоток.

Принцип работы моделируемого в программе гибридного магнитопровода заключается в функционировании в различных режимах работы на двух участках кривых. На первом участке намагничивание аморфного сплава происходит с явным преимуществом, что подтверждается наличием выпуклого участка на отрезке от 0 до 1 Тл. Такие характеристики обусловлены высокой начальной магнитной проницаемостью  $\mu_r$  стали 1СР, что свидетельствует о меньшем значении сопротивления магнитной цепи при одинаковых значениях площади поперечного сечения и длины средней линии магнитного потока. На втором участке, начинающемся с точки пересечения кривых намагничивания двух

сплавов, при увеличении напряженности магнитного поля происходит процесс обратного перераспределения магнитного потока, что обуславливается значительным уменьшением магнитной проницаемости аморфного сплава и соответствующем увеличением его магнитного сопротивления до значений, превышающих значения сопротивления магнитомягкого сплава 49К2ФА.

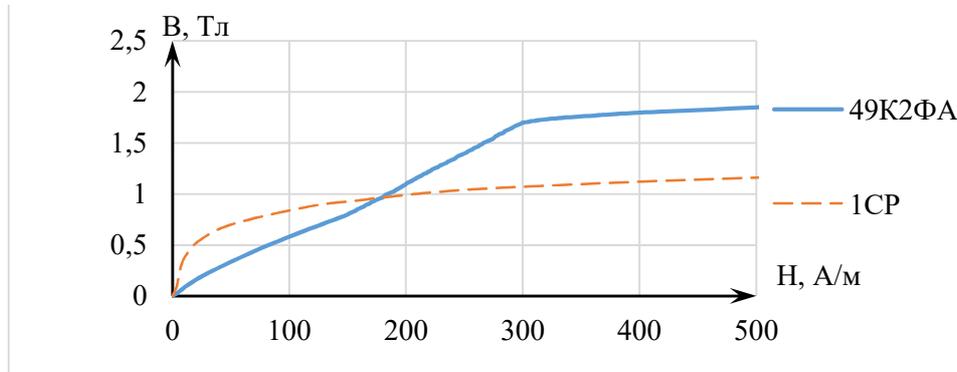


Рисунок 10 – Кривые намагничивания стали марки 1СР и сплава марки 49К2ФА

Соединение обмоток в программе реализуется посредством построения схемы соединения с ассоциативными трехмерной модели катушками (рисунок 11).

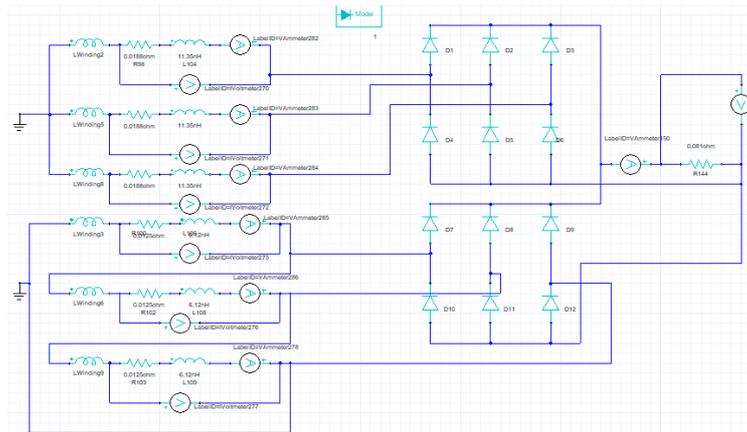


Рисунок 11 – Схема соединения вторичных обмоток с диодными мостами и нагрузкой в *Ansys Simplorer*

Далее в программном комплексе при синусоидальном магнитном потоке определение потерь в стали производится по уравнениям Штейнмеца:

$$P_v = P_h + P_c + P_e = C_{dc} K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1,5}, \quad (4)$$

где  $P_h, P_c, P_e$  – потери на гистерезис, вихревые токи и добавочные потери;

$K_h, K_c, K_e$  – коэффициенты потерь на гистерезис, вихревые токи и добавочных потерь, полученные на основании зависимостей удельных потерь от частоты перемагничивания  $f$  и индукции магнитного поля в магнитопроводе  $B$ ;

$B_m$  – амплитудное значение индукции.

$C_{dc}$  – коэффициент постоянной составляющей равен 1 при её отсутствии в зависимости, а иначе равный:

$$C_{dc} = \sqrt{\frac{K_{dc} |B_{dc}|}{B_m + 1}}, \quad (5)$$

где  $B_{dc}$  – компонента постоянной составляющей индукции магнитного поля;  
 $K_{dc}$  – коэффициент подмагничивания от постоянной составляющей.

По уравнениям (4) – (5) методом конечно-элементного моделирования определяются амплитудные значения потерь и формируется график потерь в магнитной системе от времени (рисунок 12).

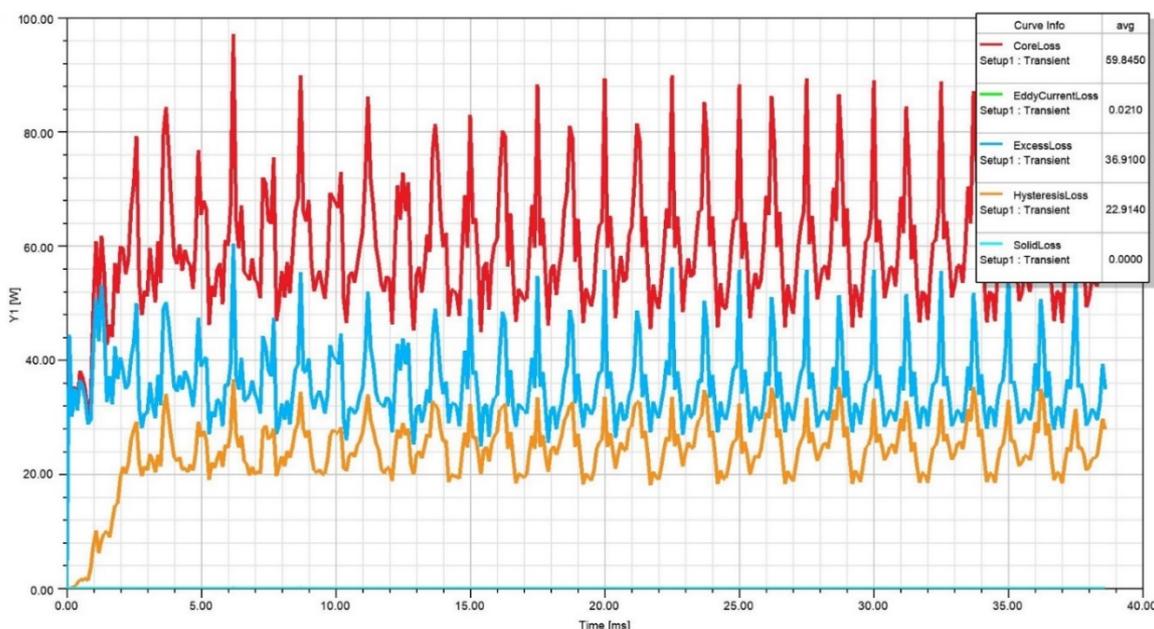


Рисунок 12 – График потерь в гибридном магнитопроводе трансформатора в режиме холостого хода

По рисунку 12 видно, что рассчитанная средняя величина потерь в магнитопроводе в установившемся режиме равна 59,8 Вт при питающем напряжении 115/200 В; 400 Гц. Колебания амплитуды в графике потерь вызваны импульсным характером работы и перемагничиванием с частотой коммутации.

Таким образом, решения по способу намотки катушек трехстержневого выпрямительного трансформатора и переход к конструкции, обеспечивающей равенство магнитных потоков, направлены на повышение энергетической эффективности входного звена источника питания электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев. Снижение уровня потерь положительно сказывается на тепловом режиме энергосистемы. Выпрямительная система с вращающимся магнитным полем позволяет минимизировать разность амплитуд в фазах сети, разработанная система с минимальным потоком рассеяния позволяет снизить нагрузку в сети, а моделирование позволяет верифицировать результаты расчетов величины потерь и оценить тепловыделение в магнитопроводе.

**В четвертой главе** работы описано экспериментальное исследование разработанного на базе кафедры Электромеханика ФГБОУ ВО «УГАТУ» демонстрационного образца ТВУ с гибридным магнитопроводом из двух ферромагнитных сплавов.

Методика расчета магнитной системы сводится к определению объема материала каждой из составляющих магнитной системы:

$$\frac{V_{c2}}{V_{c1}} = \frac{B_{s1} \cdot p_{c2}}{B_{s2} \cdot p_{c1}} \quad (6)$$

где  $V_{c1}, V_{c2}$  – суммарный объем первого и второго материала в  $n$  слоях;

$B_{s1}, B_{s2}$  – индукция насыщения первого и второго материала соответственно;

$p_{c1}, p_{c2}$  – удельные потери первого и второго материала соответственно.

Другим важным расчетным значением является коэффициент заполнения магнитопровода. Для расчета предложена формула определения коэффициента заполнения  $k_{3z}$  для  $n$  материалов в конструкции гибридного магнитопровода:

$$k_{3z} = (S_1 + S_2 + \dots + S_n) \left( \frac{k_{3z1}}{S_1} + \frac{k_{3z2}}{S_2} + \dots + \frac{k_{3zn}}{S_n} \right), \quad (7)$$

где  $k_{3z1}, k_{3z2}, k_{3zn}$  – коэффициенты заполнения для каждого материала;

$S_1, S_2, S_n$  – площади, заполняемые каждым из материалов.

Экспериментальное исследование проведено в испытательном цехе АО «УАПО» г. Уфа. Экспериментальная установка состоит из источника питания переменного тока *Croma 61612*. В качестве измерительных приборов использованы мультиметры (поз.3-6 на рисунке 13). Выходные концы трансформатора подключены к блоку выпрямителей (поз.1 рисунок 13), соединенному по схеме Ларионова. В выпрямителе использованы диоды Шоттки STPS24045TV, закрепленные на радиаторе. Охлаждение трансформатора (поз.2) осуществляется с использованием диффузора поз.7 и вентилятора поз.8. Для нагрузки ТВУ использован блок дискретно-регулируемых нагрузок на 27 В постоянного тока.

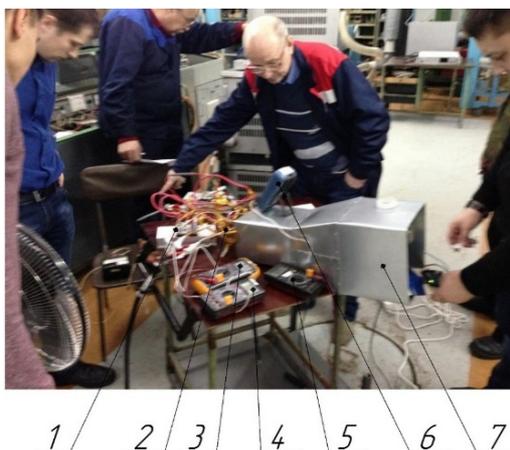


Рисунок 13 – Экспериментальная установка для испытания ТВУ на базе трансформатора с гибридным магнитопроводом

Изготовленный трансформатор имеет гибридную магнитную систему (рисунок 14, а)), состоящую из двух идентичных ленточных магнитопроводов (рисунок 14, б)). Один выполнен из сплава 49К2ФА, а второй из аморфного сплава 1СР. Сердечники произведены на базе ПАО «Ашинский металлургический завод».

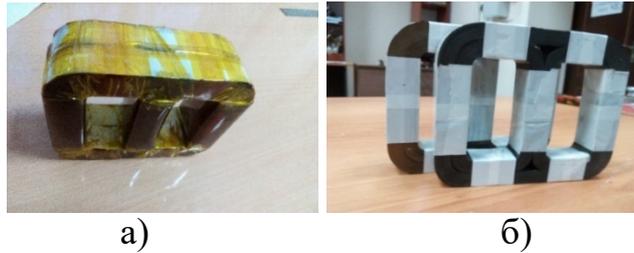


Рисунок 14 – Гибридный магнитопровод трансформатора а) и его составные части б)

На этапе работы трансформатора в режиме холостого хода (XX) произведены измерения тока XX и потерь XX. Измерения были проведены для двух значений рабочих напряжений, равных номинальному значению и значению с отклонением в 5%, находящемуся на границе предела зоны допустимых отклонений питающего напряжения. В ходе эксперимента при изменении напряжения были изменены и частоты питающего напряжения в пределах рабочих частот трансформатора.

При запуске трансформатора с напряжением  $U_{\text{пит}}=116,1$  В и частотой  $f=400$  Гц (рисунок 15, а)) получены значения потерь холостого хода, равные 65,1 Вт, и токов холостого хода по фазам  $I_A=1,478$ А,  $I_B=1,262$ А и  $I_C=1,5$ А, что соответствует  $I_{XX}=1,413$ А.

Для случая запуска трансформатора с напряжением  $U_{\text{пит}}=109$  В и частотой  $f=800$  Гц (рисунок 15, б)) получены значения потерь холостого хода, равные 20,4 Вт, и токов холостого хода по фазам  $I_A=0,224$ А,  $I_B=0,181$ А и  $I_C=0,226$ А, что равно  $I_{XX}=0,21$ А. При сравнении наблюдается снижение тока на 85%, а потерь на 68,7%.

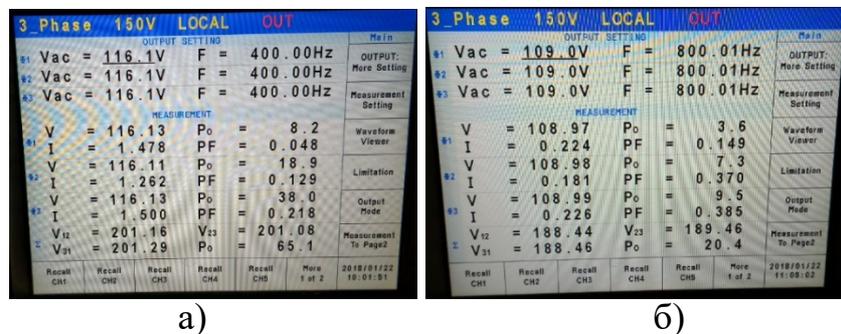


Рисунок 15 – Таблица заданных и измеренных параметров напряжения, тока и потерь в трансформаторе на холостом ходу при 116 В; 400 Гц а) и при 109 В; 800 Гц б)

На втором этапе проверялись номинальные режимы работы при  $U_{\text{пит}}=116,1$  В; 400 Гц и  $U_{\text{пит}}=108$ В; 800 Гц. Осциллограммы выпрямленного тока и напряжения на рисунке 16.

Значения абсолютных коэффициентов пульсаций при частоте 400 Гц составляет – 0,04, а при частоте 800 Гц – 0,087.

На третьем этапе эксперимента проверен режим перегрузки в 1,5 раза в течение 5 минут и режим перегрузки в 2 раза в течение 5 с.

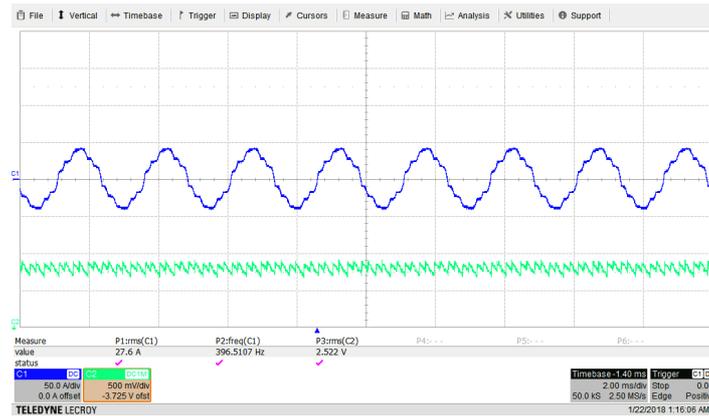


Рисунок 16 – Формы выходного тока (сверху) и выпрямленного напряжения (снизу) на выходе ТВУ при нагрузочном токе 330 А

Для анализа энергетической эффективности ТВУ выполнен расчет КПД. Значения КПД получены из отношения выходной и потребляемой мощности. Полученные значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Оценка КПД ТВУ

	Частота питающего напряжения 400 Гц			Частота питающего напряжения 800 Гц			
	Ток нагрузки 150 А	Ток нагрузки 330 А	Ток нагрузки 450 А	Ток нагрузки 150 А	Ток нагрузки 330 А	Ток нагрузки 450 А	Ток нагрузки 600 А
$P_2$ , Вт	1360	3945	8250	3615	7524	9855	11699
$P_1$ , Вт	1652,1	4532,6	9401,3	3839,6	7989,7	10491,5	12445,3
КПД, о.е	0,82	0,87	0,87	0,94	0,94	0,94	0,94

Для сравнения, аналогичный ТВУ, выполненный с магнитопроводом из аморфного сплава 1СР имеет КПД при напряжении питания 116 В, частоте 400 Гц и токах нагрузки 150 А – 0,82; 330 А – 0,85; 450 А – 0,84.

Таким образом, при работе гибридных магнитных систем происходит непропорциональное насыщение магнитопроводов, сопровождающееся изменением их магнитного сопротивления, что позволяет в разных режимах работы задействовать достоинства каждого из составляющих магнитную систему материала. В рассматриваемом случае получены значения потерь холостого хода, равные 20,4 Вт и тока холостого хода равного  $I_{XX}=0,21$  А при 108 В и 800 Гц, а при 116,1 В и 400 Гц получены потери холостого хода 65,1 Вт и тока холостого хода  $I_{XX}=1,413$  А. При подобном сравнении наблюдается снижение тока на 85%, а потерь на 68,7%, что подчеркивает перераспределение магнитных потоков в магнитопроводе и изменение магнитных сопротивлений. В связи с чем с ростом нагрузки трансформатор становится энергоэффективнее и в ряде режимов имеет КПД выше аналога с магнитопроводом из аморфной стали на 2-3%. Работа трансформатора в 12-пульсном преобразователе позволяет вести речь о высоком уровне электромагнитной совместимости с сетью, что подтверждают высокие показатели абсолютного коэффициента пульсаций, равного 0,04 для частоты 400 Гц и 0,087 для частоты 800 Гц. Такой подход позволяет повысить энергетические характеристики ТВУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационное исследование посвящено совершенствованию характеристик преобразователей параметров электроэнергии ЭТУИН, для обеспечения согласования их с сетью и нагрузкой и повышения энергетической эффективности при каскадном соединении многофункциональных трансформаторов и полупроводниковых преобразователей энергии.

Основными результатами проделанной работы являются:

1. Разработаны схемные решения источников питания, включающих каскадное соединение высокоэффективных многофункциональных и полупроводниковых преобразователей электроэнергии с улучшенными энергетическими характеристиками.

2. Разработаны и запатентованы уникальные технические решения выпрямительных систем для источников питания электротехнологических установок, включающих индукционный нагрев, позволяющие обеспечивать преобразователь частоты выпрямленным напряжением, осуществить согласование источника с сетью и с нагрузкой. Кроме того, разработаны конструкции трансформаторов с гибридным магнитопроводом, с минимальным потоком рассеяния, с вращающимся магнитным полем, обеспечивающие повышение энергетических характеристик за счет перераспределения магнитных потоков, снижения потоков рассеяния за счет расчета обмотки по разработанной при участии автора методике, достижение симметричности токов и напряжений и повышение качества электроэнергии за счет равенства средних длин линий магнитного потока.

3. Разработана математическая модель процесса намагничивания магнитопровода УЧФ с помощью аппроксимации по методу Бесселя. Полученная математическая модель при разбиении рассматриваемого периода перемагничивания на 16 равных частей позволяет получить решение с расхождением с экспериментальными данными в пределах 15%.

4. Сформированы и внедрены в учебный процесс методики расчета обмотки трансформатора, обладающего минимальным потоком рассеяния, и расчета гибридной магнитной системы выпрямительного трансформатора.

5. Получены результаты экспериментального исследования ТВУ с гибридным магнитопроводом, в ходе которого произведены замеры потерь холостого хода в магнитопроводе и впоследствии сопоставлены с результатами компьютерного моделирования. Полученные в результате моделирования значения находятся в пределах 10%-го отклонения от экспериментальных данных. Подтверждена работоспособность разработанного образца, доказана его энергетическая эффективность. КПД разработанного образца выше ближайшего аналога с магнитопроводом из аморфной стали марки 1СР в режимах перегрузки выше на 2-3%. Абсолютный коэффициент пульсаций при этом не превышает  $k_{\Pi} = 0,04$  при частоте 400 Гц и  $k_{\Pi} = 0,087$  при частоте 800 Гц. Результаты теоретических, прикладных и экспериментальных исследований в области гибридных магнитных систем выпрямительных трансформаторов внедрены в АО УНПП «Молния» г.Уфа.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI:**

1. Рогинская Л.Э. Исследование работы многофункциональных трансформаторов в качестве устройств обеспечения электромагнитной совместимости / Л.Э. Рогинская, А.Р. Латыпов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 21. – С. 36-48.

2. Исмагилов Ф.Р. Обоснование целесообразности применения аморфной стали в магнитопроводах трансформаторно-выпрямительных устройств летательных аппаратов / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Д.В. Гусаков, А.А. Меднов // Электричество. – 2018. – № 5. – С. 39-44.

3. Рогинская Л.Э. Выбор параметров многофункционального трансформатора / Л.Э. Рогинская, А.Р. Латыпов, А.А. Меднов // Вестник Московского энергетического института. – 2019. – № 1. – С. 61-68.

**Публикации в отечественных журналах из перечня изданий ВАК, включенных в международные базы Web of Science, Scopus:**

4. Вавилов В.Е. Исследование 18-пульсного трансформаторно-выпрямительного устройства с магнитопроводом из аморфной стали / В.Е. Вавилов, Д.В. Гусаков, И.И. Ямалов, Д.Р. Фаррахов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров // Электротехника. 2020. № 2. С. 31-34.

5. Vavilov V.E. Study of a 18-pulse transformer-rectifier unit with an amorphous steel magnetic core / V.E. Vavilov, D.V. Gusakov, I.I. Yamalov, D.R. Farrakhov, A.A. Mednov, A.K. Miniyarov // Russian Electrical Engineering. 2020. Т. 91. № 2. С. 104-107.

6. Жеребцов, А.А. Исследования электромагнитных характеристик кольцевых образцов магнитной фазы двухфазного магнитного материала на основе железокобальтовой стали / А.А. Жеребцов, А.В. Асылбаев, А.А. Меднов // Электротехника. – 2022. – № 12. – С. 23-25.

7. Zherebtsov, A.A. Studying the Electromagnetic Properties of Ring Specimens of the Magnetic phase of a dual-phase magnetic material based on iron–cobalt steel / A.A. Zherebtsov, A.A. Mednov, A.V. Asylbaev // Russian Electrical Engineering. – 2022. – 93(12). – pp. 764-766.

**В изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS, Web of Science (всего 12 шт.):**

8. Ismagilov F.R. 18-pulse transformer rectifier unit with an amorphous magnetic core for aircraft / F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, D.V. Gusakov, V.S. Vavilova, A.A. Mednov // International Review of Electrical Engineering. – 2018. – Т. 13. № 1. – p. 9-14.

9. Roginskaya L.E. Mathematical model of a multifunctional high-frequency transformer for electrotechnological installation power supplies. / L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov, A.A. Mednov // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2019. PP. 1-4.

10. Roginskaya L.E. DC power supply based on a rectifying transformer with a rotating magnetic field. / L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov, A.A. Mednov // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2020. – PP.1-4.

11. Mednov A.A. Transformer development trend / M.Yu. Yanturaev, A.A. Mednov, I.Kuznetsov, A.I. Zaiko, D.V. Gusakov, S. Voronin // 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2021. – PP.446-448.

12. Roginskaya L.E. Hybrid magnetic systems as a way to obtain required magnetic properties. / L.E. Roginskaya, A.S. Gorbunov, A.A. Mednov, D.V. Gusakov // 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2021. – PP. 245-248.

**Патенты (всего 5 шт.):**

13. Рогинская Л.Э. Обмотка трансформатора / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Меднов // Патент на полезную модель №194636 U1 H01F 30/04 (2006.01) H01F 5/04 (2006.01). заявл.: 14.01.2019г. опубл.: 18.12.2019г.

14. Рогинская Л.Э. Преобразователь переменного напряжения в постоянное (варианты) / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Меднов // Патент на изобретение №2661890 C1 H02M 7/08 (2006.01). заявл.:24.04.2017г. опубл.: 20.07.2018г.

15. Рогинская Л.Э. Многопульсное выпрямительное устройство / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Меднов // Патент на полезную модель №184790 U1 H02M 1/14 (2006.01) G05F 1/30 (2006.01) H02M 7/162 (2006.01) H02M 7/17 (2006.01). заявл.:13.06.2018г. опубл.: 09.11.2018г.

16. Исмагилов Ф.Р. Магнитопровод трансформатора (варианты) / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, Д.В. Гусаков, А.Х. Минияров, А.А. Меднов // Патент на изобретение №2656861 C1 от 07.06.2018г.

**Статьи в других изданиях (всего 25шт.):**

17. Меднов А.А. Выпрямительный трансформатор с минимальным потоком рассеяния / А.А. Меднов // Гагаринские чтения - 2019. – 2019. – С. 465-466.

18. Меднов А.А. Аналитическое определение оптимальных соотношений материалов гибридных магнитных систем / А.А. Меднов, И.Ф. Саяхов, А.Х. Минияров // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте (ИИТМА-2020). сборник материалов IV Международной научно-практической конференции с онлайн-участием. Кемерово, 2020. С. 336-338.

19. Каримов Р.Д. Моделирование магнитной системы трансформатора с вращающимся магнитным полем / Р.Д. Каримов, А.А. Меднов // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. Сборник статей VI Международной научно-практической конференции в 2-х частях. Саратов, 2020. С. 96-100.

20. Рогинская Л.Э. Преобразователи частоты для электротехнологических процессов, включающих индукционный нагрев / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, А.А. Меднов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2 (14). С. 72-82.

Соискатель



А.А. Меднов