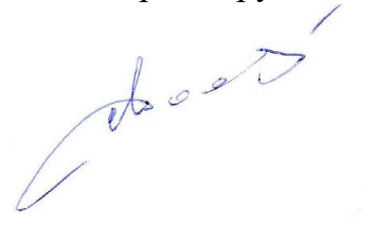


На правах рукописи



ЛИХАЧЕВ Денис Игоревич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ИНВЕРТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПИТАНИЯ МАШИН КОНТАКТНОЙ СВАРКИ**

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Сахно Людмила Ивановна

Официальные оппоненты: **Цицикян Георгий Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
Заместитель начальника отдела НИО-11 филиала «Центральный
научно-исследовательский институт судовой электротехники и
технологии» Федерального государственного унитарного
предприятия «Крыловский государственный научный центр»,
г. Санкт-Петербург

Кручинина Ирина Юрьевна
доктор технических наук,
Врио директора Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени
Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова
Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится « 24 » апреля 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета
Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении
высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" по
адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд.284.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО
«СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.16

к.т.н., доцент



Журавлева Наталья Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Контактная сварка – это основной способ сварки давлением, при котором соединение образуется вследствие нагрева электрическим током и сжатия свариваемых деталей в зоне контактирования. Контактная сварка занимает более 30 % общего объема производства сварных конструкций в мире. Силовая электрическая часть машины контактной сварки (МКС) состоит из источника питания и токоподводов к свариваемым деталям. Наиболее распространены МКС с источниками питания промышленной частоты, но ведущие мировые производители активно внедряют МКС с инверторными источниками питания (ИИП) и выпрямлением сварочного тока. Эти источники улучшают технико-экономические показатели МКС и расширяют их технологические возможности. Повышение частоты инвертора позволяет уменьшить массу и размеры трансформатора за счет уменьшения площади поперечного сечения магнитопровода и средней длины витков медных обмоток. Компактные трансформаторы востребованы для подвесных МКС в автомобилестроении и авиастроении, для сварки арматуры под железобетонные конструкции в строительстве. ИИП обеспечивают точное регулирование сварочного тока в зависимости от изменения контактного сопротивления во время сварки при длительности импульса меньше периода промышленной частоты. МКС с такими технологическими возможностями требуются для сварки деталей из циркония, титана, радиационно-стойких сталей для атомных энергетических установок и релейной техники. Создание конкурентоспособных ИИП МКС требует решения ряда сложных задач. Одна из таких задач заключается в разработке сварочных трансформаторов для частоты до 10 кГц при величине токов во вторичной обмотке до десятков тысяч ампер. Большое поперечное сечение обмоток, требуемое для таких токов, и повышенная частота приводят к сильному проявлению поверхностного эффекта в обмотках. Поверхностный эффект приводит к увеличению активного сопротивления и уменьшению индуктивности рассеяния по сравнению с трансформаторами промышленной частоты. Значительные результаты в исследованиях поверхностного эффекта в различных электротехнических устройствах получены в работах А.Б. Фильда, А. Зоммерфельда, И. Ламмеранера и М. Штафля, Г. Кадена, Л.Р.Неймана, К.С. Демирчяна, В.Н. Боронина, И.Ф. Кузнецова. Однако публикации, посвященные анализу и учету поверхностного эффекта в трансформаторах МКС, ограничены слабым проявлением поверхностного эффекта. Погрешности использования известных методов расчета трансформаторов МКС, при частотах до 10 кГц, не установлены. Многие вопросы, связанные с созданием трансформаторов ИИП МКС, решаются экспериментально путем изготовления многочисленных макетов трансформаторов. Такой подход может привести как к завышенному расходу меди, из которой изготовлены обмотки, так и к завышенному энергопотреблению МКС. В связи с этим, актуальной является

разработка методик расчета трансформаторов ИИП МКС, которые обеспечат создание трансформаторов с высокими технико-экономическими показателями.

Цель диссертационной работы - разработка методик расчета трансформаторов инверторных источников питания МКС при частотах до 10 кГц, расчетное и экспериментальное исследование поверхностного эффекта в них и создание трансформаторов с высокими технико-экономическими показателями и расширенными технологическими возможностями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику расчета активного сопротивления, индуктивности рассеяния трансформатора, а также разработать инженерную методику выбора сечения проводов обмоток, обеспечивающих минимальные потери и минимальный расход меди;
2. Разработать методику измерения активных сопротивлений обмоток и индуктивности рассеяния трансформатора при частотах до 10 кГц;
3. Выполнить анализ погрешности расчета активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния трансформаторов МКС с использованием разработанных в диссертационной работе методик путем сопоставления с результатами измерений этих параметров;
4. Исследовать влияние количества и взаимного расположения катушек на активные сопротивления обмоток и индуктивность рассеяния трансформатора;
5. Разработать конструкции сварочных трансформаторов с уменьшенными по сравнению с базовым вариантом массогабаритными показателями и электропотреблением;
6. Экспериментально подтвердить эффективность разработанных конструкций.

Научная новизна работы:

1. Получены диапазоны изменения параметров, характеризующих степень проявления поверхностного эффекта и эффекта близости, в которых справедливы выражения для расчета активных сопротивлений катушек сварочных трансформаторов с дисковыми обмотками, основанные на замене катушек плоскими однородными проводящими листами;
2. Получено экспериментальное подтверждение уменьшения активного сопротивления короткого замыкания трансформатора при уменьшении толщины катушки с одновременным уменьшением сечения провода первичной обмотки до критической величины;
3. Установлено, что уменьшение количества катушек первичной обмотки с одновременным увеличением количества витков в катушке, существенно уменьшает активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания трансформаторов средней частоты;
4. Показано, что уменьшение активного сопротивления и индуктивности рассеяния трансформатора, достигнутое за счет изменения его конструкции, увеличивает сварочный ток МКС при неизменном напряжении холостого хода трансформатора;

5. На основании сравнения расчетных и экспериментальных значений сопротивлений короткого замыкания трансформаторов МКС в диапазоне от 50 Гц до 10 кГц, установлена погрешность расчета с использованием разработанных в диссертации методик.

Практическая значимость:

1. Разработана методика расчета трансформаторов ИИП МКС, которая необходима для оптимизации таких трансформаторов и расширения их технологических возможностей;
2. Предложенные в диссертации методики расчета и измерения сопротивлений короткого замыкания трансформаторов ИИП МКС могут использоваться при разработке преобразовательных трансформаторов средней частоты;
3. Созданы и испытаны при работе в составе МКС ПТМ-5.01 два новых типа конструкции трансформаторов ИИП МКС с существенно уменьшенной массой и электропотреблением по сравнению с базовым вариантом;
4. На основе двух новых типов конструкций, разработаны и успешно внедрены в производство 7 модификаций трансформаторов ИИП МКС с номинальными токами от 5 кА до 10 кА и частотой до 10 кГц. Они эксплуатируются в МКС серии ПТМ (ПТМ-5.01), серии МТЧ (МТЧ-5.05, МТЧ-5.06, МТЧ-10.02, МТЧ-10.04), серии МТП (МТП-5.01, МТП-10.01).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Численное и аналитическое определение критической толщины катушки сварочного трансформатора, при которой потери и расход меди минимальны;
2. Методики расчета и измерения частотных зависимостей сопротивлений короткого замыкания трансформаторов ИИП МКС;
3. Способы уменьшения добавочных потерь в обмотках трансформаторов ИИП МКС, полученные из методик расчета, разработанных в диссертации;
4. Экспериментальное подтверждение технических решений, предложенных в диссертации.

Достоверность теоретических результатов основывается:

1. На корректном использовании уравнений электромагнитного поля, схем замещения трансформаторов, аналитических и численных методов решения дифференциальных уравнений;
2. Совпадением расчетных и экспериментальных значений сопротивлений короткого замыкания трансформаторов ИИП МКС при изменении частоты от 50 Гц до 10 кГц;
3. Совпадением осциллограмм сварочных токов, полученных при расчете ИИП МКС с использованием расчетных значений сопротивлений короткого замыкания трансформаторов, и сварочных токов, полученных с помощью регистратора РРС-4.

Объект исследования: трансформаторы инверторных источников питания машин контактной сварки.

Предмет исследования: электромагнитные процессы в трансформаторах инверторных источников питания машин контактной сварки, расчетное и экспериментальное определение сопротивлений короткого замыкания трансформаторов.

Методы исследования базируются на использовании общей теории трансформаторов, численных и аналитических методах расчета электромагнитных полей и электрических цепей, а также на методах измерения электрических параметров.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на IV международном научно-практическом семинаре “Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование” (Санкт-Петербург, 2007); XIV Всероссийской конференции “Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах” (Санкт-Петербург, 2010); XV Всероссийской конференции “Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах” (Санкт-Петербург, 2011); на международной конференции IEEE Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag-2013), Budapest, Hungary, 2013; на международном симпозиуме XXIV Symposium Electromagnetic Phenomenain Nonlinear Circuits (EPNC-2016), Helsinki, Finland, 2016.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации представлены в 16 работах, из них 3 - в журналах “Электричество” и «Научно-технические ведомости СПбГПУ», входящих в список ВАК РФ. Материалы конференции Compumag-2013 индексируются в базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 153 страницах, включает 12 таблиц, 45 рисунков и 76 формул. Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 126 наименований и приложения. Приложение содержит 7 актов внедрения, 1 справку о проведении промышленных испытаний и 1 справку о внедрении.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи работы, приводятся достигнутые научные и практические результаты, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткая характеристика видов контактной сварки, рассматриваются классификация, назначение, области применения и основные узлы машин контактной сварки. Источник питания любой МКС включает следующие элементы: трансформатор, сварочный контур (токоподводы к месту сварки) и аппаратуру управления сварочным процессом. Питание МКС осуществляется от трехфазной сети промышленной частоты.

В диссертационной работе рассматриваются МКС с ИИП для точечной контактной сварки деталей из нержавеющей стали, циркониевых и титановых сплавов толщиной до 0,5+0,5 мм. Электрическая схема ИИП, который рассматривается в диссертационной работе, состоит из

трехфазного мостового выпрямителя, подключенного к трехфазному источнику питания переменного тока промышленной частоты, емкостного фильтра выпрямителя, инвертора, сварочного трансформатора, выпрямителя со средней точкой и активно-индуктивной нагрузки. Особенностью электрического режима работы трансформатора в этом источнике является поочередное протекание тока по каждому из двух витков вторичной обмотки. По условиям технологии сварки таких деталей, частота инвертора составляет от 1 кГц до 10 кГц, номинальный сварочный ток - от 3 кА до 10 кА, продолжительность нагрузки от 10% до 15 %.

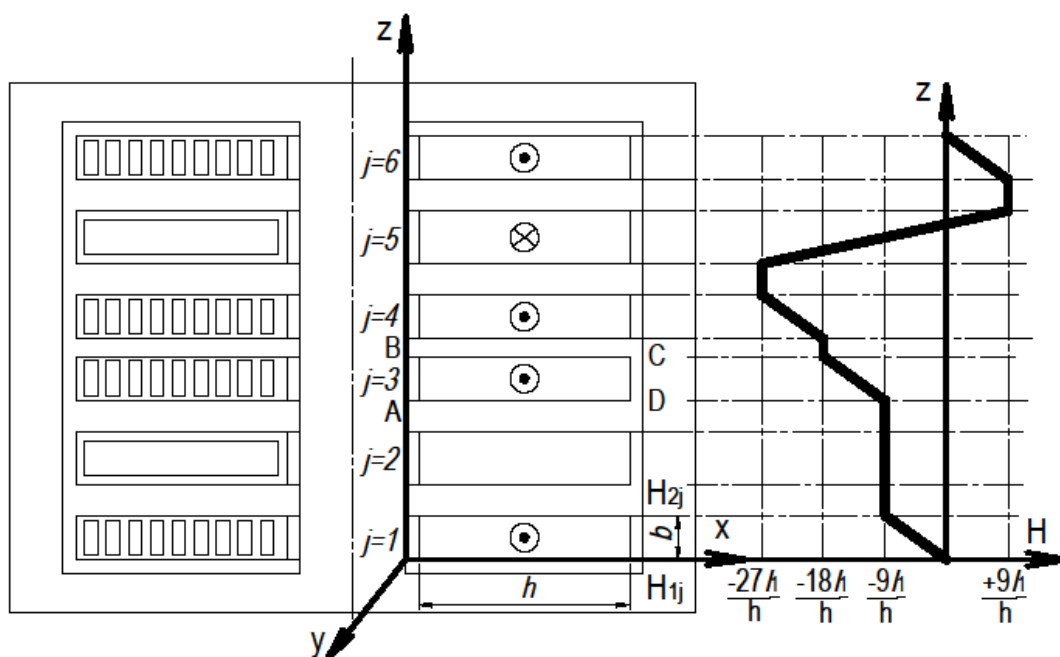


Рисунок 1 – К расчету активного сопротивления и индуктивности рассеяния трансформатора ВТ-1

На основе анализа различных конструкций сварочных трансформаторов, для исследования выбрана конструкция, используемая в большинстве МКС промышленной частоты. Трансформатор имеет дисковые чередующиеся обмотки и магнитопровод броневого типа. Первичная обмотка трансформатора выполняется из медного провода прямоугольного сечения, вторичная обмотка - из сплошных медных дисков с трубками, напаянными по периметру диска, либо из медных трубок. По трубкам протекает охлаждающая жидкость. Конструкция трансформатора ВТ-1 инверторного источника питания МКС (рис.1) была взята в качестве базовой конструкции для исследования. Сварочный ток ВТ-1 составляет 3 кА при частоте инвертора 1,5 кГц и продолжительности нагрузки 12%. Для расширения технологических возможностей этих МКС необходимо увеличить сварочный ток и частоту инвертора.

Разработка и оптимизация конструкции трансформаторов МКС требует создания методики расчета активных и индуктивных сопротивлений трансформаторов с дисковыми обмотками при частотах до 10 кГц и исследований влияния поверхностного эффекта на эти параметры. Создание методики базируется на анализе задач, решенных в классической теории трансформато-

ров, что позволило наметить направления разработки новых конструкций трансформаторов - уменьшение магнитного поля рассеяния и уменьшение до критических (по Фильду) толщин катушек. В первой главе обосновывается необходимость исследования влияния конструктивных параметров трансформатора на активное сопротивление и индуктивность рассеяния: количества катушек первичной обмотки и витков в отдельной катушке; взаимного расположения катушек первичной и вторичной обмоток и расстояний между ними; толщины катушек первичной обмотки. В результате исследования необходимо найти значения указанных параметров, при которых электропотребление и масса трансформатора будут существенно уменьшены по сравнению с базовой конструкцией.

Во второй главе рассматриваются методы расчета и измерения электромагнитных параметров трансформаторов ИИП МКС. В отличие от сварочных трансформаторов с дисковыми чередующимися обмотками промышленной частоты, в исследуемых трансформаторах каждая катушка вторичной обмотки проводит ток только в течение половины каждого периода. Это препятствует расположению обмоток в катушечных группах (катушка вторичной обмотки, окруженная двумя катушками первичной обмотки), в которых скомпенсированы магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток. Из-за этого увеличивается магнитное поле рассеяния и добавочные потери в обмотках трансформатора ИИП МКС по сравнению с трансформаторами с частотой 50 Гц. Для нахождения конструктивных решений, позволяющих уменьшить поле рассеяния и добавочные потери, каждая катушка трансформатора заменяется плоским однородным проводящим листом с усредненной электрической проводимостью, например, листом *ABCD* (рис.1). Значения напряженностей магнитного поля на границах каждого *j*-ого листа (катушки) H_{1j} и H_{2j} находятся из условия противовключения первичной и вторичной обмоток, когда геометрическая сумма векторов магнитодвижущих сил обмоток равна нулю.

Эпюра изменения напряженности магнитного поля рассеяния $H=H_x$ вдоль оси *OZ* при девяти витках в каждой катушке первичной обмотки ($w'_1 = 9$) при равномерном распределении токов по сечениям обмоток, полученная для режима противовключения, показана на рис.1. Из эпюры можно найти напряженности магнитного поля H_{1j} и H_{2j} на границах любой катушки с номером *j*. Решение одномерного дифференциального уравнения относительно комплексной напряженности магнитного поля с заданными граничными условиями, позволило получить выражения для активного и индуктивного сопротивлений листа, приходящихся на единицу его длины в направлении оси *OY*:

$$R_j = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\gamma}} \cdot \frac{(n_j^2 + 1)\varphi - n_j\psi}{(n_j - 1)^2} \cdot \frac{1}{h}; \quad X = \frac{l \cdot w^2}{\gamma \cdot b \cdot h} \cdot \frac{(H_1^2 + H_2^2) \cdot \varphi_1 - H_1 H_2 \cdot \psi_2}{(H_2 - H_1)^2}, \quad (1)$$

$$\psi = 2 \frac{sh\beta_j \cos\beta_j + \sin\beta_j ch\beta_j}{ch^2\beta_j - \cos^2\beta_j}; \quad \varphi = \frac{\sin 2\beta_j + sh2\beta_j}{ch2\beta_j - \cos 2\beta_j}; \quad \psi_1 = 2\beta_j \frac{sh\beta_j \cos\beta_j - \sin\beta_j ch\beta_j}{ch^2\beta_j - \cos^2\beta_j} \quad \varphi_1 = \beta_j \frac{sh2\beta_j - \sin 2\beta_j}{ch2\beta_j - \cos 2\beta_j}, \quad (2)$$

где $\beta_j = b_j/a$ - относительная толщина листа с номером j ; b_j - реальная толщина j -го листа; $a = \sqrt{2/\omega\mu\gamma}$ - эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны в проводник; h - ширина листа; $\omega = 2\pi f$; f - частота синусоидального напряжения трансформатора; μ - магнитная проницаемость обмоток; γ - удельная электрическая проводимость листа; $n_j = H_{2j}/H_{1j}$.

Для более точного расчета активного сопротивления обмоток и расчета индуктивности рассеяния применялся метод конечных элементов, реализованный в программе ELCUT. Это устраняло основное допущение рассмотренного выше метода – замену катушек обмоток однородными плоскими листами. При использовании метода конечных элементов сохраняется допущение о плоскопараллельности электромагнитного поля рассеяния трансформатора. Погрешность, связанная с дискретизацией расчетной области, оценивалась путем сопоставления с результатами расчета активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния в модельных задачах. В качестве модельных задач рассматривались расчеты активных сопротивлений и внутренних индуктивностей плоских проводящих листов, для которых имеются аналитические решения. Разработана методика выбора шагов дискретизации, при которой погрешность расчета активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния, связанная с дискретизацией расчетной области, не превышает 1%. На основе расчетов с использованием метода конечных элементов получено, что погрешность расчета активных сопротивлений катушек по (1), связанная с заменой катушек плоскими листами с усредненными значениями удельных электрических проводимостей, не превышает 10 % при значениях параметра $\beta_j < 1,5$.

Для анализа погрешности расчета активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния необходим доступный метод измерения этих величин. Проблема измерения состоит в том, что для проведения опыта короткого замыкания необходим источник питания синусоидального напряжения мощностью до 10 кА, позволяющий регулировать частоту в диапазоне от 50 Гц до 10 кГц. В связи с отсутствием такого источника был проведен анализ возможности измерений с использованием измерителя иммитанса Е7-20, диапазон рабочих частот которого составляет от 25 Гц до 1 МГц. Погрешность расчета активного сопротивления и индуктивности рассеяния в исследуемом диапазоне изменения частоты, найденная путем сопоставления с результатами измерений Измерителем иммитанса, составляет около 10% (без массивных выводов вторичных обмоток). Эта погрешность вызвана допущениями, принятыми при расчете (плоскопараллельность поля рассеяния, пренебрежение отличием поля в лобовых частях обмоток трансформатора от расчетной модели).

В третьей главе исследуется влияние поверхностного эффекта на активные сопротивления и индуктивности рассеяния трансформаторов ИИП МКС при изменении частоты в диапазоне от 50 Гц до 10 кГц. Для анализа частотных зависимостей активных сопротивлений транс-

форматоров рассматриваются два относительных активных сопротивления катушки (все относительные сопротивления в дальнейшем будут помечены звездочками):

1. Отношение $R_j^* = R_j / R_{0j}$ активного сопротивления j -ой катушки R_j при переменном токе к её сопротивлению при постоянном токе R_{0j} ;
2. Отношение $R_j^{**} = R_j / R_a$ активного сопротивления j -ой катушки R_j при переменном токе к сопротивлению $R_a = 1/\gamma ah$ постоянному току пластины, бесконечно протяженной в направлении оси OY (рис.1), толщина которой равна эквивалентной глубине проникновения $a = \sqrt{2/\omega\mu\gamma}$. Относительное сопротивление R_j^* показывает увеличение сопротивления катушки при переменном токе по сравнению с её сопротивлением при постоянном токе и позволяет оценить величину добавочных потерь в ней. Относительное сопротивление R_j^{**} при постоянных значениях ω , μ , γ пропорционально активному сопротивлению R_j катушки, поэтому позволяет исследовать в относительных единицах зависимость активного сопротивления катушки от её толщины b - то есть исследовать эффективность вложения меди в обмотки. При замене катушки плоским однородным листом, относительные активные сопротивления равны:

$$R_j^* = F \cdot \beta; \quad R_j^{**} = F, \quad \text{где} \quad F = \frac{(n^2 + 1)\rho - n\psi}{(n - 1)^2}, \quad (3)$$

Согласно (3), относительные сопротивления катушки R_j^* и R_j^{**} зависят только от двух безразмерных параметров β_j и n_j , характеризующих конструкцию трансформатора, частоту и электромагнитные характеристики катушек. Расчет зависимости R_j^* для катушек первичной и вторичной обмоток базового трансформатора ВТ-1 от частоты и от соответствующей этой частоте относительной толщины катушки β , рассчитанные по (3), показан на (рис.2.а). Из этих зависимостей видно, что наибольшее увеличение относительного сопротивления наблюдается для катушек первичной обмотки с номерами $j=3, 4$. Например, уже при частоте 500 Гц, сопротивление R_j катушки с номером $j=4$ превышает ее сопротивление при постоянном токе в 3 раза, а при номинальной частоте этого трансформатора 1,5 кГц – превышает в 14 раз. Такое значительное увеличение сопротивления объясняется тем, что эта катушка находится в наибольшем поле рассеяния. Показателем интенсивности поля рассеяния является параметр n_j , который характеризует эффект близости катушек. Значения этого параметра для катушек первичной обмотки, рассчитанные на основе эпюры напряженности магнитного поля (рис.1), составляют $n_1 = n_6 = 0$; $n_4 = 0,67$; $n_3 = 0,5$. Большие добавочные потери в катушках свидетельствует о завышенных толщинах катушек этого трансформатора и возможности перерасхода меди в них. Для анализа

влияния толщин катушек на их активные сопротивления на рис.2б построены зависимости R_j^{**} от относительной толщины катушек β , абсолютной толщины катушки и от частоты при толщине

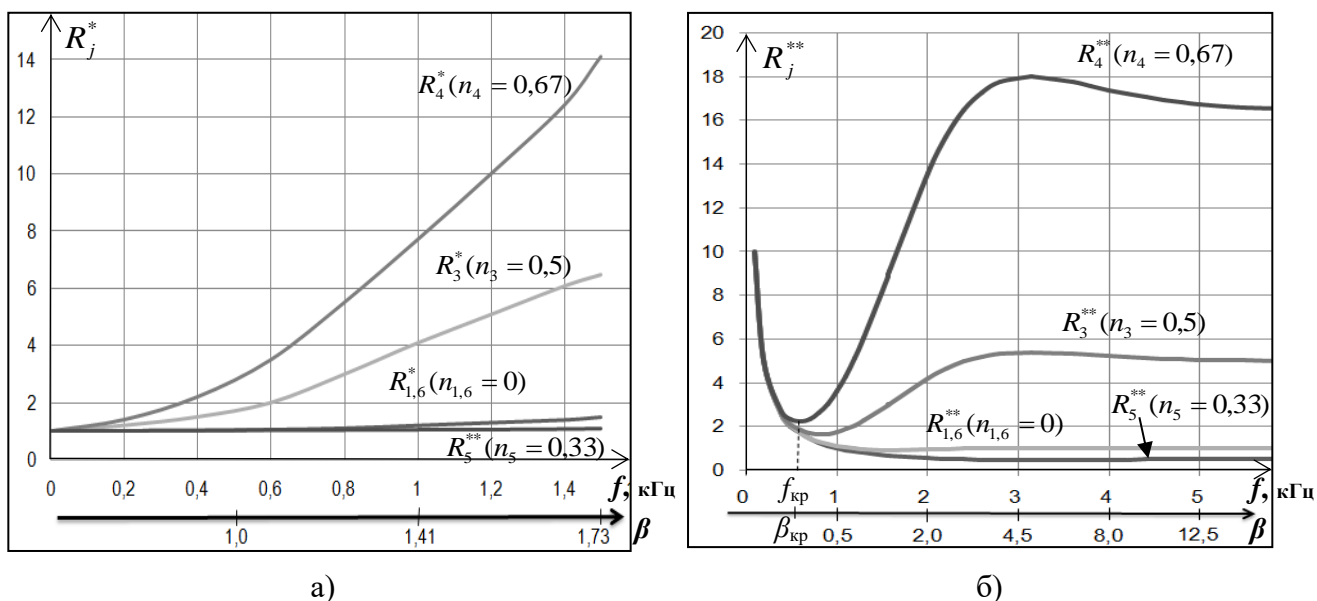


Рисунок 2 - Частотные зависимости относительных сопротивлений катушек ВТ-1

не катушки первичной обмотки трансформатора ВТ-1 (5 мм). Эти зависимости имеют минимумы, различные для каждой катушки. Это означает, что при некотором критическом значении относительной толщины катушки $\beta = \beta_{кр}$, сопротивление катушки минимально. Критическому значению относительной толщины соответствует критическое значение реальной толщины катушки $b = b_{кр} = \beta_{кр} \sqrt{2/\omega\mu\gamma}$. Увеличение толщины b катушки свыше критической величины приводит к перерасходу меди. Согласно рис.2б, отклонение толщины катушки от критической для катушек с номерами $j=1, 5, 6$ не приводит к существенному увеличению потерь, а для катушек $j=3, 4$ даже небольшое отклонение от критических значений ведет к резкому росту потерь. Эту разницу следует учесть при разработке новых конструкций трансформаторов.

Для исследования активных сопротивлений трансформатора ВТ-1 при частотах выше 1,5 кГц, расчеты относительных сопротивлений выполнялись методом конечных элементов с использованием пакета ELCUT. На основании этих расчетов найдены критические значения толщин катушек базового трансформатора в диапазоне от 1,5 кГц до 10 кГц. Расчеты частотных зависимостей активного сопротивления базового трансформатора, приведенного к первичной обмотке, показали, что это сопротивление является сложной функцией, зависящей не только от параметров n_j и β_j катушек, но и от соотношения активных сопротивлений обмоток при постоянном токе: первичной обмотки R_{01} и приведенного к первичной обмотке условного сопротивления вторичной обмотки $R'_{02} = R_{02}k_{12}^2$ (R_{02} - активное сопротивление вторичной обмотки при постоянном токе, $k_{12} = w_1/w_2$ - коэффициент трансформации). Например, при частотах до 1 кГц, приведенное активное сопротивление вторичной обмотки больше

сопротивления первичной, так как ее сопротивление постоянному току больше, чем условное приведенное к первичной обмотке сопротивление вторичной обмотки (рис.3а). Но уже при частоте 3 кГц - эти сопротивления становятся приблизительно одинаковыми, а при дальнейшем увеличении частоты активное сопротивление первичной обмотки превышает активное сопротивление вторичной обмотки.

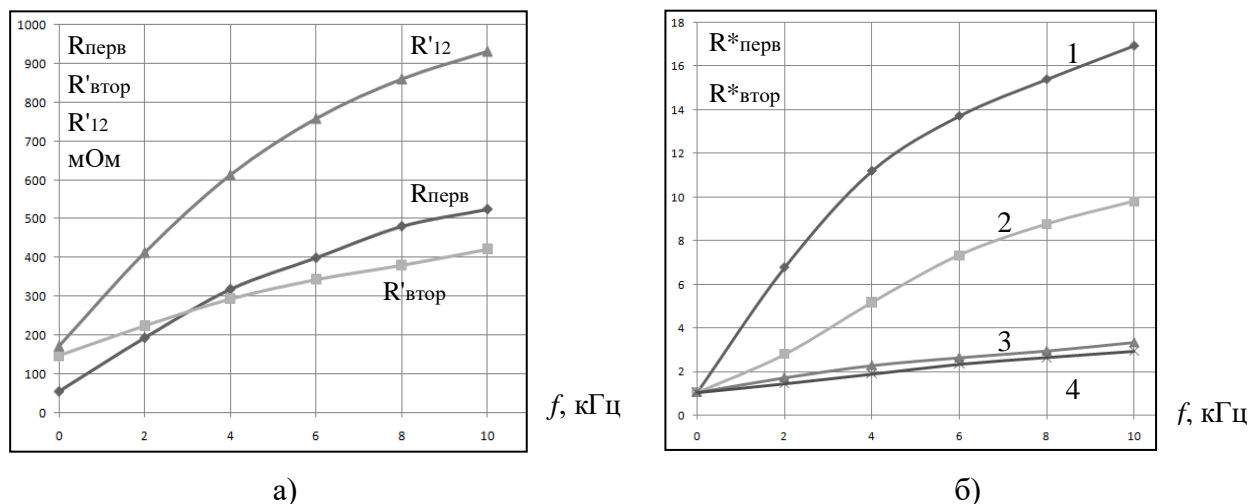


Рисунок 3 - Зависимость активных сопротивлений от частоты для трансформаторов:

а) обмоток ВТ-1; б) ВТ-1 (кривые 1, 3) и ВТ-2 (кривые 2, 4)

Анализ частотных зависимостей активных сопротивлений базового трансформатора ВТ-1 показал, что для уменьшения потерь следует изготавливать катушки первичной обмотки из провода толщиной не более критической: с увеличением частоты до 10 кГц толщина катушек с номерами $j=4$ и $j=3$ должна быть меньше 1 мм. Но это усложняет изготовление трансформатора. Для уменьшения добавочных потерь и индуктивности рассеяния трансформатора, которые приводят к перерасходу меди при высоких частотах, предложено изменить расположение катушек таким образом, чтобы улучшить чередование первичной и вторичной обмоток. Следует расположить все витки первичной обмотки в двух катушках, а оба диска вторичной обмотки расположить между ними, то есть радикально изменить традиционное для трансформаторов МКС промышленной частоты чередование первичной и вторичной обмоток (по одной катушке первичной обмотки с обеих сторон диска вторичной). Это существенно уменьшит индуктивности рассеяния трансформатора и добавочные потери в катушках первичной обмотки. Добавочные потери в обеих катушках первичной обмотки будут незначительно отличаться от добавочных потерь в катушках 1 и 6 на рис.2б, и даже значительное отклонение толщины обмотки от критической величины не приведет к сильному увеличению потерь в катушке.

В четвертой главе приводятся результаты разработки трансформаторов для ИИП МКС с номинальной частотой до 10 кГц и номинальным сварочным током до 6,7 кА. Каждая конструкция имеет несколько модификаций, которые отличаются размерами и количеством витков первичной обмотки.

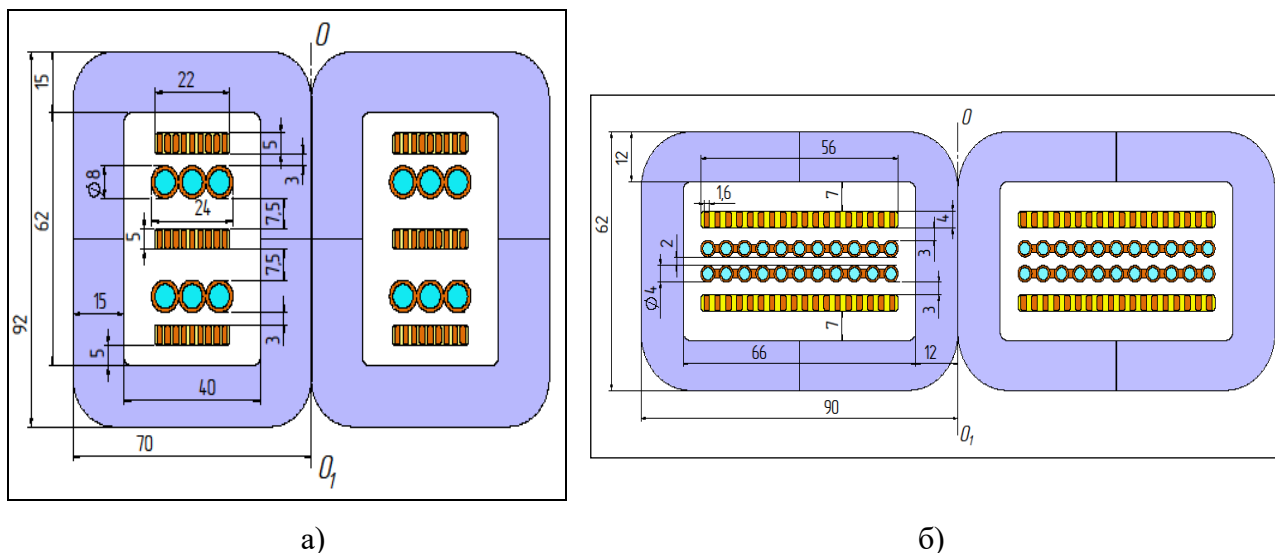
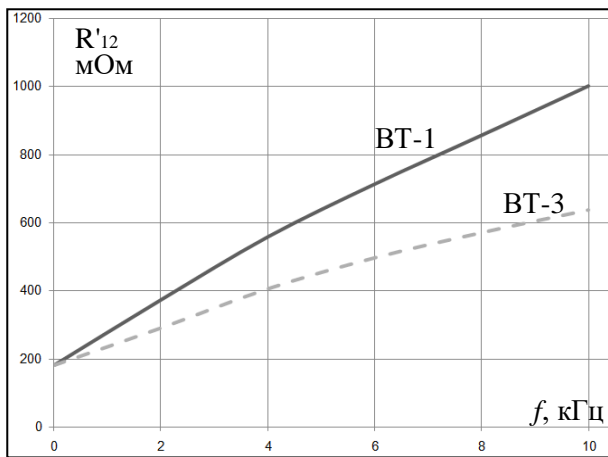
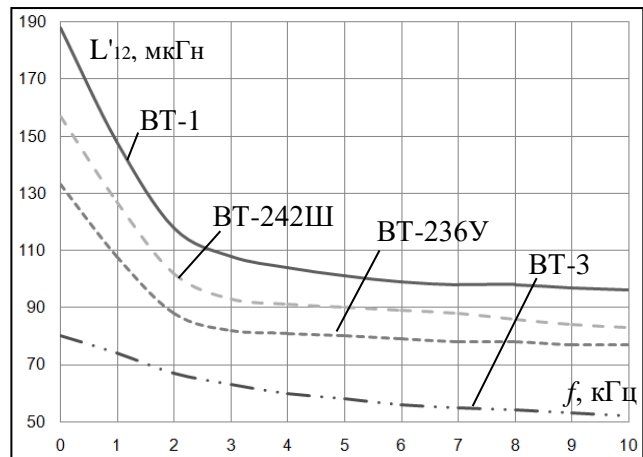


Рисунок 4 – Разработанные конструкции трансформаторов ВТ-2 (а) и ВТ-3 (б)

Приведем некоторые результаты сравнения базового трансформатора ВТ-1 и лучшего из разработанных ВТ-3. Они имеют одинаковое количество витков первичной обмотки. Толщина проводов первичной обмотки ВТ-3 выбрана близкой к критической толщине для частоты 10 кГц, сечение первичной обмотки уменьшено приблизительно на 50% по сравнению с трансформатором ВТ-1 (первичная обмотка трансформатора ВТ-1 выполнена из провода $5,0 \times 2,0 \text{ мм}^2$, ВТ-3 - из провода $4,0 \times 1,6 \text{ мм}^2$). Поскольку при этом средняя длина витков обмотки трансформатора ВТ-3 уменьшена также приблизительно на 50 %, сопротивления первичных обмоток трансформаторов ВТ-1 и ВТ-3 приблизительно одинаковы. Результаты расчетов относительных сопротивлений первичной и вторичной обмоток для этих трансформаторов показаны на рис.3б (кривые 1, 2 – относительные сопротивления первичных обмоток для ВТ-1, ВТ-3; кривые 3, 4 – относительное сопротивление вторичной обмотки для ВТ-1 и ВТ-3). Относительное сопротивление первичной обмотки ВТ-3 существенно меньше, чем у ВТ-1 так как для любой его первичной обмотки параметр $n_j=0$. Частотные зависимости активных сопротивлений короткого замыкания и индуктивностей рассеяния этих трансформаторов, измеренные Измерителем иммитанса Е7-20, показаны на рис.5. Поясним полученные результаты. Трансформаторы ВТ-1 и ВТ-3 имеют приблизительно одинаковые условные сопротивления короткого замыкания постоянному току, приведенные к первичной обмотке. Поэтому при низких частотах сопротивления этих трансформаторов отличаются незначительно. При повышении частоты сопротивление короткого замыкания трансформатора ВТ-3 увеличивается медленнее, чем у ВТ-1, так как добавочные потери в его обмотках существенно меньше (рис.3б), так как для любой его первичной обмотки параметр $n_j=0$. Поэтому при частоте 10 кГц активное сопротивление короткого замыкания трансформатора ВТ-3 на 67 % меньше сопротивления короткого замыкания трансформатора ВТ-1 несмотря на то, что сечение проводов первичной обмотки этого трансформатора в 1,56 раз меньше, чем у ВТ-1.



а)



б)

Рисунок 5 - Экспериментальные частотные характеристики трансформаторов

Экспериментальные значения индуктивностей рассеяния трансформатора ВТ-3 почти в два раза меньше, чем индуктивности рассеяния трансформатора ВТ-1 при любой частоте, поскольку в ВТ-3 существенно улучшено чередование катушек первичной и вторичной обмоток.

Трансформаторы ВТ-1 и ВТ-3 были испытаны при работе в составе одной МКС с инверторным источником питания при одинаковом вторичном напряжении холостого хода трансформаторов, равном $U_{2xx}=15В$. Это значение вторичного напряжения в опытах обеспечено регулированием первичного напряжения сварочного трансформатора. При частоте инвертора 7,5 кГц максимальные сварочные токи, измеренные регистратором РРС-4, составляют 3,1 кА для трансформатора ВТ-1 и 6,7 кА для ВТ-3. Увеличение сварочного тока в МКС при замене в ней трансформатора ВТ-1 на ВТ-3 при одинаковом напряжении холостого хода вторичной обмотки подтверждает уменьшение полного сопротивления трансформатора ВТ-3, которое достигнуто за счет улучшения чередования катушек первичной и вторичной обмоток. По сравнению с ВТ-1, расход электротехнической стали в магнитопроводе и расход меди для трансформатора ВТ-3 уменьшены в два раза. Уменьшение расхода меди достигнуто за счет уменьшения сечения первичной обмотки трансформатора ВТ-3 (толщины катушек близки к критическим) и уменьшения средней длины витка, а уменьшение расхода стали за счет уменьшения площади поперечного сечения магнитопровода, так как для получения одинакового сварочного тока напряжение холостого хода вторичной обмотки ВТ-3 приблизительно в два раза меньше, чем у ВТ-1. В главе 4 также приведены результаты расчета добавочных потерь и определения критической толщины проводов обмоток статора вентильного двигателя мощностью 335 кВт для верхнего электропривода мобильных буровых установок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получены выражения для расчета активного сопротивления дисковых обмоток трансформатора ИИП МКС из уравнений электромагнитного поля в плоском однородном проводящем листе;

2. Разработана инженерная методика выбора сечения обмоток, обеспечивающая минимальные потери при минимальном расходе меди и определены границы ее применимости;
3. Разработана методика измерения активных сопротивлений обмоток и индуктивности рассеяния трансформаторов ИИП МКС при высоких частотах;
4. Определено, что погрешность расчета активных сопротивлений и индуктивности рассеяния трансформаторов ИИП МКС по разработанным методикам не превышает 10 %;
5. Предложены способы уменьшения активного и индуктивного сопротивлений трансформаторов ИИП МКС: уменьшение толщины катушек по сравнению с базовым вариантом и сокращение количества катушек первичной обмотки;
6. Разработаны 2 новые конструкции трансформаторов ИИП МКС с частотой работы до 10 кГц, масса и электропотребление которых значительно уменьшены по сравнению с базовым трансформатором ВТ-1, а технологические возможности расширены;
7. Эффективность разработанных конструкций трансформаторов ИИП МКС и методик их расчета подтверждена результатами измерений сварочных токов регистратором РРС-4 в ходе проведения прямо-сдаточных испытаний в составе МКС.

Публикации в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ

1. Сахно Л.И. Метод расчета магнитного поля в магнитопроводе двухобмоточного трансформатора при установившемся режиме короткого замыкания / Л.И. Сахно, Д.И. Лихачев // Электричество, ISSN 0013-5380. - 2011. - №11. – С. 55-65.
2. Сахно Л.И. Оптимизация конструкции трансформатора для инверторного источника питания машины контактной сварки / Л.И. Сахно, О.И. Сахно, Д.И. Лихачев // Электричество, ISSN 0013-5380. - 2013. - №5. – С.28-36.
3. Сахно Л.И. Аналитический расчет импеданса трансформатора машины контактной сварки / Л.И. Сахно, О.И. Сахно, Ю.В. Варламов, Д.И. Лихачев // Научно-технические ведомости СПбГПУ, ISSN 1994-2354. - 2016- №1(238)/2016. – С.57-64.

Публикации в других изданиях

4. Сахно Л.И., Сахно О.И., Лихачев Д.И. Метод расчета критической толщины дисков обмоток трансформаторов машин контактной сварки // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы IV международного научно-практического семинара. – СПб: ООО «Агентство «ВиТ-Принт»», 2007. – С. 167-169.
5. Сахно Л.И., Лихачев Д.И. Снижение электропотребления инверторными источниками питания машин контактной сварки // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XIV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург. Т. 2. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 83.

6. Сахно Л.И. Инженерный метод расчета критической толщины дисков обмоток трансформаторов машин контактной сварки / Л.И. Сахно, О.И. Сахно, Д.И. Лихачев // Сварочное производство, ISSN 0491-6441. - 2010. - №1. – С. 17-18.
7. Сахно Л.И. Влияние частоты инвертора на массу трансформатора машины контактной сварки / Л.И. Сахно, Д.И. Лихачев, А.С. Сибирко // Сварочное производство, ISSN 0491-6441. - 2011. - №12. – С. 48.
8. Сахно Л.И., Лихачев Д.И. Методы расчета частотных характеристик трансформаторов машин контактной сварки // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург. Т. 2. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 54-55.
9. Sakhno L. An engineering method of calculating the critical thickness of the discs of the windings of transformers for resistance-welding machines / L. Sakhno, O. Sakhno, D. Likhachev // Welding International. – 2011, ISSN 0950-7116. -Vol.25. –No.7. - P.526-530.
10. Лихачев Д.И. Обзор предложений машин контактной сварки с инверторными источниками питания на современном рынке и их преимущества / Д.И. Лихачев // Станочный парк, ISSN 2075-1036. - 2012. - №4. – С.27-29.
11. Сахно Л.И. Измерение частотных зависимостей сопротивлений короткого замыкания трансформаторов инверторных источников питания машин контактной сварки / Л.И. Сахно, Д.И. Лихачев // Станочный парк, ISSN 2075-1036. - 2012. - №4. – С.32-33.
12. Федоров П.Д. Инверторные машины для контактной микросварки / П.Д. Федоров, Н.Я. Смирнов, Д.И. Лихачев // Сварщик. - 2012. - №32 (84). – С. 36-39.
13. Sakhno L., Sakhno O., Likhachev D. The numerical calculation of short circuit resistance of transformers of inverter power source welding machines // Conference on computation of electromagnetic fields (Compumag-2013), Budapest, Hungary, 2013. Режим доступа: <http://www.compumag.org/jsite/compumag-conferences.html> (18.01.2018) (*индексируется в базе Scopus*).
14. Сахно Л.И., Лихачев Д.И. Расчет потерь в обмотках электрических машин с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости // Евразийский союз ученых: XXI Международная конференция «Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения», Ч.5, Москва, декабрь 2015, ISSN 2411-6467. - №12 (21) / 2015. – С.72-75.
15. Лихачев Д.И. Аналитический расчет индуктивности рассеяния трансформаторов машин контактной сварки / Д.И. Лихачев // Молодой ученый, ISSN 2072-0297. - 2016. - №4 (108)/2016. – С. 58-60.
16. Sakhno L., Fedorov P., Likhachev D. Field-Circuit modeling of the resistance spot welding transformers// XXIV Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits 28.06-01.07.2016. - Helsinki, Finland, 2016.
Режим доступа: <http://ptetis.put.poznan.pl/epnc/index.php/detailed-program/> (18.01.2018).