На правах рукописи

Befor

ВЕРЕТЕННИКОВ Николай Юрьевич

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель:	Башкиров Алексей Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры ФГБОУ ВО «ВГТУ»	
Официальные оппоненты:	Битюков Владимир Ксенофонтович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий.	
	Тихонов Андрей Ильич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина», профессор кафедры «Электромеханика».	

Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Московский государственный
	технический университет
	им. Н. Э. Баумана», г. Москва

Защита состоится «25» сентября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03 в конференц-зале ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» https://cchgeu.ru/

Автореферат разослан «10» июля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.286.03, к.т.н., доцент

Фёдоров С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Радиотехника является одним из динамично развивающихся направлений науки и техники. Миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры, увеличение её сложности и рост энергопотребления приводят к ужесточению требований к массогабаритным параметрам источников питания, и как следствие, к повышению их рабочих частот с целью снижения габаритных размеров магнитопровода трансформаторов и дросселей. В то же время, критичным параметром становятся тепловые потери, для уменьшения которых разработчики стремятся максимально повышать КПД разрабатываемых изделий.

Рабочая частота современных транзисторных преобразователей составляет сотни килогерц, а иногда достигает 1 МГц и выше. Это приводит к существенному увеличению динамических потерь в полупроводниковых компонентах, а также к значительным сложностям в расчете и моделировании силовых трансформаторов и дросселей, от эффективности которых зависят основные параметры изделий. Со снижением габаритов увеличивается плотность тока в проводниках, что в сочетании с ростом частоты и усилением влияния высокочастотных эффектов приводит к значительным погрешностям при использовании традиционных методик расчета.

В настоящее время существует несколько способов оценки и моделирования потерь в проводниках трансформаторов и дросселей. Самым распространенным и наиболее простым способом является оценка потерь по среднеквадратичному току, протекающему в витках магнитного компонента. Однако, с усилением влияния скин-эффекта и эффекта близости такой способ начинает давать существенную ошибку в расчетах даже на относительно низких рабочих частотах. В силу этого для расчета высокочастотных потерь в магнитных компонентах часто прибегают к моделированию с помощью специализированных программных комплексов, использующих в своих расчетах метод конечных элементов.

Такой способ расчета обладает высокой точностью и показывает результаты достаточно близкие к потерям в реальном изделии, однако, применение подобных программных пакетов связано с повышением трудоемкости и повышенным требованием к вычислительной мощности ЭВМ, что оборачивается существенным увеличением временных затрат при проектировании изделия. К тому же, для выбора оптимальной топологии витков трансформатора и толщины проводника требуется многократное итеративное построение геометрической модели, либо изменение уже существующей модели, с последующим численным моделированием, что существенно увеличивает трудоемкость и время проектирования изделия.

Другим распространенным способом моделирования высокочастотных потерь, вызываемых вихревыми токами в обмотках трансформаторов и дросселей, является применение формулы Доуэлла для токов синусоидальной формы или её модификации для токов произвольной формы, предложенной Б. Карстеном. При этом трехмерная модель магнитного компонента преобразуется в одномерную, что существенно упрощает расчеты. За счет такого упрощения данный подход является менее требовательным к вычислительной мощности ЭВМ и обладает намного большим быстродействием, однако вместе с тем обладает меньшей точностью по сравнению с моделированием в конечных элементах. При этом, представленный способ позволяет выбрать оптимальную толщину проводника и произвести первичную оценку потерь в магнитных компонентах при условии, что их обмотки не чередуются между собой. Несмотря на перечисленные преимущества, данный способ не может быть применен к трансформаторам с чередующимися обмотками, а также, к магнитным компонентам с поочередно протекающими токами (таким как связанные дроссели), а следовательно, не позволяет выбрать оптимальное взаимное расположение витков магнитного компонента, что накладывает существенные ограничения на его применение в разработке устройств.

Задача снижения потерь, вызываемых эффектом близости и скинэффектом, в витках трансформаторов рассматривалась в работах Е. Н. Кобзарь, О. И. Сахно, Л. И. Сахно, Д. И. Лихачева применительно к инверторам машин контактной сварки. В работах были получены формулы для расчета индуктивности рассеяния и сопротивления по переменному току трансформатора с произвольной конфигурацией поля на границах слоев. Однако, представленная в работе методика расчета потерь не может быть применена в полной мере для импульсных источников питания, поскольку токи, протекающие в обмотках трансформатора, носят не синусоидальную форму.

Таким образом, анализируя представленное выше заключение можно прийти к выводу, что разработка новой методики моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов, которая будет устранять недостатки известных методов, совмещая их сильные стороны на сегодняшний день является актуальной задачей.

Степень научной разработанности. Явления скин-эффекта и эффекта близости в проводниках, вызванные током синусоидальной формы, рассматривались П. Доуэллом в пятидесятых годах прошлого века. Было получено уравнение, позволяющее с достаточной точностью определять сопротивление проводника в дросселе по переменному току. Однако, в импульсных источниках питания мы сталкиваемся с не синусоидальной формой тока, что приводит к дополнительным потерям вследствие возникновения высокочастотных гармоник. В 1986 году Б. Карстен расширил анализ потерь, разложив токи прямоугольной и треугольной формы в ряд Фурье и применив формулу Доуэлла к каждой гармонике ряда.

Задача расчета и оптимизации витков трансформатора в машинах контактной сварки рассматривалась Л. И. Сахно, О. И. Сахно и Д. И. Лихачевым. В работах были получены формулы для расчета сопротивления по переменному току трансформатора, а также представлена методика оптимизации высокочастотных потерь в трансформаторах с произвольной конфигурацией поля на границах слоев. Однако, представленная методика не может быть применена в полной мере для оптимизации трансформаторов источников питания, поскольку токи, протекающие в обмотках, имеют не синусоидальную форму для большинства топологий импульсных преобразователей. К тому же, представленная в работах методика расчета сопротивления по переменному току не учитывает возможности поочередного протекания токов в первичной и вторичной обмотках, как это происходит в магнитном компоненте обратноходового преобразователя.

Таким образом, приближенные методики расчета высокочастотных потерь не нашли широкого применения среди разработчиков и исследователей. Основной причиной этого являются их ограниченные возможности. Так с помощью формулы Доуэлла могут быть с достаточной точностью вычислены потери в многослойных проводниковых структурах. Однако, при проектировании трансформаторов используется рад приемов, позволяющих существенно снизить высокочастотные потери, таких как чередование слоев или сегментация первичной и вторичной обмоток. При этом может быть достигнут значительный эффект в виде снижения потерь, который совершенно не может быть описан в рамках рассматриваемого математического аппарата. На сегодняшний день в доступной литературе отсутствует описание полноценных методик, позволяющих оценивать высокочастотные потери в трансформаторах с учетом указанных конструктивных особенностей.

Объектом исследования является процесс проектирования импульсных источников вторичного электропитания, имеющих в своем составе магнитные элементы в виде трансформаторов и дросселей.

Предметом исследования является методическое обеспечение для моделирования и оценки высокочастотных потерь в обмотках магнитных элементов при проектировании импульсных ИВЭ, входящих в состав современных радиотехнических устройств.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка методик расчета высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов, позволяющих снизить временные затраты на моделирование и повысить эффективность проектирования импульсных источников питания.

При разработке методик необходимо исходить из фундаментальных законов и методов электродинамики и теории поля, а также опираться на классическую теорию трансформаторов, изложенную в работах В. В. Афанасьева, С. Н. Кризе, С. Б. Васютинского, Л. В. Лейтеса, П. Н. Матханова, С. С. Вдовина, а также учитывать результаты исследования поверхностного эффекта в электронных устройствах, изложенные в работах в работах А. Зоммерфельда, И. Ламмеранера и М. Штафля, П. Доуэлла и Б. Карстена.

Для ее достижения представляется необходимым решить следующие задачи.

1. Выполнить анализ известных методов и средств оценки потерь в магнитных компонентах, вызванных эффектом близости и скин-эффектом. Выявить основные преимущества и недостатки известных методик, а также определить возможные пути их устранения. 2. Разработать методику расчета и моделирования потерь в витках магнитных компонентов импульсных источников питания, учитывающую возможность чередования обмоток трансформаторов с целью снижения влияния эффекта близости, а также позволяющую производить оценку потерь в магнитных компонентах с произвольной конфигурацией поля на границах слоев обмоток.

3. Разработать методику расчета и моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов с поочередно протекающими токами в обмотках, учитывающую возможность чередования обмоток магнитного компонента и позволяющую обеспечить высокий уровень производительности вычислений при сохранении достаточного уровня точности.

4. Разработать методику аппроксимации эффекта близости с помощью эквивалентной схемы замещения с заданной точностью для анализа потерь в магнитном компоненте во временной области.

5. Провести экспериментальную проверку эффективности разработанных методик расчета потерь в обмотках путем измерения потерь в магнитном компоненте понижающего и обратноходового преобразователя, а также моделирования с помощью специализированных САПР и сравнения полученных результатов с результатами разработанных методик.

Научная новизна результатов исследования. В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной.

1. Методика аппроксимации эффекта близости во временной области, отличающаяся алгоритмом поиска номиналов компонентов схемы замещения и позволяющая проводить аппроксимацию зависимости сопротивления компонента от частоты с заданной точностью.

2. Методика расчета и моделирования потерь в витках магнитных компонентов с чередующимися обмотками, отличающаяся возможностью аналитического расчета потерь в трансформаторах с произвольной конфигурацией поля на границах слоев обмоток.

3. Методика расчета и моделирования потерь в витках магнитных компонентов с поочередно протекающими токами в обмотках, обеспечивающая возможность оценки эффективности топологии магнитного компонента и выбора оптимальной толщины проводника до его численного моделирования.

Теоретическая значимость работы состоит в создании методик, позволяющих произвести численную оценку рассеиваемой мощности в магнитных компонентах. При этом используется аналитический подход, основанный на решении уравнений Максвелла для поля с произвольной конфигурацией на границах слоев обмотки.

Практическая значимость работы заключается в разработке программных решений для численной оценки потерь в обмотках магнитного компонента. Такой подход позволяет выбрать оптимальную топологию при проектировании трансформатора и существенно сокращает время на разработку радиотехнических устройств в части моделирования и оптимизации высокочастотных потерь, вызываемых скин-эффектом и эффектом близости в обмотках трансформаторов и дросселей. Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам области исследования паспорта специальности **2.2.13.** «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»: (1) «Исследование процессов и явлений в радиотехнике, позволяющих повысить эффективность радиотехнических устройств и систем», (14) «Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем, включая системы цифрового телевидения высокой, сверхвысокой, ультравысокой четкости и других форматов, для телевизионного вещания и специальных применений», (16) «Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических и телевизионных устройств и систем, включая черно-белые, цветные, спектрозональные, инфракрасные, терагерцовые и многоракурсные телевизионные системы, пассивные и активные системы объемного телевидения».

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использованы методы электродинамики, теории цепей, математического моделирования, метод эквивалентных схем, методы численного моделирования с помощью САПР и программирования на языках Python и MATLAB.

Положения, выносимые на защиту.

1. Применение методики моделирования высокочастотных потерь в обмотках трансформаторов импульсных источников питания с чередующимися обмотками и произвольной формой протекающего тока позволяет снизить потери, возникающие в витках трансформаторов путем многовариантного анализа полученных значений рассеиваемой мощности для различных структур витков магнитного компонента, обеспечивая при этом отклонение от экспериментальных результатов в пределах 16%. При этом, время, затрачиваемое на моделирование, существенно сокращается.

2. Применение методики моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитного компонента с чередующимися обмотками при поочередно протекающих токах в обмотках позволяет снизить потери в трансформаторе обратноходового преобразователя до 12%.

3. Использование методики аппроксимации эффекта близости во временной области с использованием метода эквивалентной схемы, позволяет повысить точность вычислений по сравнению с аналитическими методами, вследствие расчета потерь в обмотке в составе схемы конечного изделия. Разработанный алгоритм аппроксимации эффекта близости в виде эквивалентной схемы позволяет аппроксимировать частотные характеристики с погрешностью до 0,1 %. К примеру, для аппроксимации эффекта близости в обмотке дросселя понижающего преобразователя с использованием десяти звеньев эквивалентной схемы относительное отклонение во всем требуемом диапазоне частот не превышало 1%.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается сопоставлением результатов, полученных с помощью разработанных методик с результатами известных методик и способов моделирования, а также результатами экспериментальных измерений. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах:

- Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации (ФТИ-2021)». 2021 г, Воронеж.

- Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь (RLNC*2021)». 2021 г, Воронеж.

- Международная конференция «International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021». 2021 г, USA, Detroit.

- Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь (RLNC*2022)». 2022 г, Воронеж.

- Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь (RLNC*2023)». 2023 г, Воронеж.

- Международная конференция «IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)», 2024 г, республика Алтай

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 работ опубликовано в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций (три из которых включены в базу данных Scopus). Имеется 2 зарегистрированных программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 64 наименований. Основная часть работы изложена на 119 страницах, содержит 45 рисунков и 15 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, предложены и обоснованы пути решения поставленных задач, приведено краткое описание работы, изложены основные научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе работы выполнен анализ литературных источников на тему моделирования и уменьшения высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов. А именно описываются механизмы возникновения скинэффекта и эффекта близости в проводниках, а также рассматриваются основные методы и средства оценки высокочастотных потерь, вызываемых скинэффектом и эффектом близости, в обмотках магнитных компонентов. Для решения данной проблемы многие предприятия прибегают к использованию специализированных программных комплексов, с помощью которых можно моделировать различные высокочастотные эффекты, возникающие в обмотках и магнитопроводе трансформаторов и дросселей. Тем самым определяется эффективность той или иной топологии витков магнитного компонента. Однако, моделирование с использованием подобных пакетов требует построения новой геометрической модели магнитного компонента для каждой итерации проектирования, к тому же, численное моделирование отличается повышенными требованиями к вычислительным ресурсам ЭВМ, что существенно увеличивает временные затраты на проектирование изделий.

Также в главе рассматриваются известные аналитические методы оценки потерь в обмотках трансформаторов и дросселей. Рассматриваются преимущества и недостатки каждого из аналитических методов, происходит конкретизация проблематики работы.

Во второй главе работы показаны теоретические данные, на которых базируется представленное научное исследование. В частности, представлен способ определения потерь в трансформаторах с чередующимися обмотками при одновременном протекании токов в обмотках. Основной особенностью представленного способа является нахождение коэффициентов напряженности поля на границах каждого слоя обмотки в трансформаторах с произвольной конфигурацией слоев обмоток с последующим нахождением вектора Пойнтинга, на границах слоя обмотки. Таким образом, рассеиваемая в каждом проводящем слое обмотки мощность рассчитывается как сумма потерь по нескольким гармоникам по формуле

$$P_i(d) = P_{ACi}(d) + P_{DCi}(d), \tag{1}$$

где

$$P_{ACi}(d) = \sum_{n} P_{ACin}(d) =$$

$$= \sum_{n} \operatorname{Re} \left\{ \frac{m_{n} l_{i} I_{n}^{2}}{h\sigma} \cdot \left((n_{1i}^{2} + n_{2i}^{2}) \operatorname{cth}(m_{n} d) - \frac{2|n_{1i}||n_{2i}|}{\operatorname{sh}(m_{n} d)} \right) \right\},$$

$$P_{DCi}(d) = (q_{i} I_{DCi})^{2} R_{DCi} = \frac{(q_{i} I_{DCi})^{2} l_{i}}{h d\sigma},$$

где P_i — мощность, рассеиваемая в слое *i*, P_{ACi} — потери по переменному току в слое *i*, P_{DCi} — потери по постоянному току в слое *i*, P_{ACin} — мощность, рассеиваемая в слое *i* для *n*-й гармоники, *d* — толщина слоя *i*, $m_n = \sqrt{j\omega_n\mu_0\sigma}$, $\omega_n = 2\pi f_n, f_n$ — частота гармоники тока *n*, σ - удельная проводимость меди, l_i - длина витка слоя *i*, I_n — среднеквадратичный ток n-й гармоники в соответствующей (первичной или вторичной) обмотке, *h* — высота окна сердечника, n_{li} — коэффициент напряженности поля на внешней границе слоя *i*, n_{2i} — коэффициент напряженности поля на внешней границе слоя *i*, n_{2i} — коэффисти поля на внутренней границе слоя *i*, n_{2i} — коэффисти поля на внутренней границе слоя *i*, n_{2i} — коэффисти поля на внутренней границе слоя *i*, n_{2i} — коэффисти слою *i*, R_{DCi} — постоянная составляющая тока в обмотке, *c*оответствующей

На основе полученных теоретических формул представлена методика моделирования и минимизации высокочастотных потерь в витках трансформаторов с поочередно протекающими токами в обмотках. Как и ранее в рассматриваемой методике необходимо найти коэффициенты напряженности поля на границах слоев обмоток трансформатора на каждом отдельном такте его работы. Затем необходимо определить потери на каждом такте работы трансформатора и усреднить полученные значения рассеиваемой мощности пропорционально длительности каждого такта.

$$P_i(d) = P_{i1}(d)D + P_{i2}(d)(1-D) + P_{DCi}(d),$$
(2)

где $D = \frac{t_u}{T}$ — коэффициент заполнения импульса преобразователя, t_u — время прямого такта работы преобразователя (время импульса), T — период работы преобразователя, $P_i(d)$ — мощность, рассеиваемая в *i*-м слое, $P_{DCi}(d)$ — потери по постоянному току в слое *i*. $P_{i1}(d)$ и $P_{i2}(d)$ — потери на прямом и обратном такте работы преобразователя.

Таким образом, варьировав значение параметра *d* можно построить график зависимости рассеиваемой мощности от толщины (диаметра) проводника и определить оптимальное значение толщины, соответствующее минимуму потерь на графике для заданной топологии трансформатора.

Общий алгоритм моделирования высокочастотных потерь в витках магнитного компонента представлен на рисунке 1

Предложенный алгоритм позволяет проводить моделирование высокочастотных потерь в обмотках трансформаторов с чередующимися обмотками, а также определять рассеиваемую мощность в магнитных компонентах с поочередно протекающими токами в обмотках, как например, в обратноходовом трансформаторе. Таким образом, с помощью алгоритма можно получить оптимальную топологию витков трансформатора и диаметр провода, что позволяет наиболее эффективно снизить потери в обмотках, тем самым повысив КПД конечного изделия.



Рисунок 1. — Алгоритм моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитного компонента

В третьей главе представлена программная реализация способа моделирования высокочастотных потерь в магнитных компонентах на примере трансфор-

матора обратноходового преобразователя. Для трансформатора, выполненного на сердечнике ER14.5 с двумя различными топологиями обмоток определены коэффициенты напряженности поля для каждого такта работы преобразователя. Наглядно показано, что в следствие минимизации квадрата напряженности поля на границах слоев на периоде работы преобразователя, топология с чередующимися слоями обмоток (P-S-S-P) является более эффективной с точки зрения минимизации потерь, вызываемых эффектом близости по сравнению с топологией без чередования. Далее представлены результаты вычислений рассеиваемой мощности в зависимости от толщины проводника в каждой обмотке для двух выбранных топологий. Результаты расчетов при использовании провода диаметром 0,16 мм представлены в таблице 1

Таблица 1

Обозначение слоя	Топология P-P-S-S	Топология P-S-S-Р
P1	121,25 мВт	122,1 мВт
P2	169,98 мВт	235,6 мВт
S1	158,89 мВт	86,45 мВт
S2	190,73 мВт	118,6 мВт
Суммарные потери в обмотках	640,86 мВт	562,77 мВт

Рассеиваемая мощность в каждом слое трансформатора

Таким образом, чередование слоев обмоток помогает снизить суммарные потери в магнитном компоненте на 78 мВт или на 12 %, что может существенно повысить КПД конечного изделия.

Далее главы рассматривается реализация метода эквивалентной цепи, позволяющего выполнять анализ высокочастотных потерь в обмотках во временной области, тем самым убрав необходимость разложения тока произвольной формы по гармоническим составляющим. Предложен новый алгоритм, позволяющий аппроксимировать зависимость сопротивления обмотки от частоты с помощью эквивалентной схемы с заданной точностью.

Основным критерием аппроксимации выбрана относительная ошибка

$$Err = \frac{|R_{ac}(\omega) - Z(\omega)|}{R_{ac}(\omega)},\tag{4}$$

где $Z(\omega) = Re(Z(j\omega))$ – действительная часть импеданса эквивалентной схемы, $R_{ac}(\omega)$ – зависимость сопротивления обмотки магнитного компонента от частоты.

Далее представлена программная реализация представленного алгоритма, выполненная на языке Python. Также показан пример использования эквивалентной схемы в SPICE симуляторе качестве элемента, задающего сопротивление обмотки. При сравнении значений исходных данных с аппроксимированной кривой видно, что измеренная зависимость сопротивления от частоты близка к исходным данным, а относительная ошибка (3) не превышает значения 1% в заданных точках.

В четвертой главе производится верификация предложенных способов определения потерь. Для нахождения потерь в обмотках магнитного компонента из рассеиваемой в изделии мощности вычитались все источники потерь, кроме искомого, а именно, потери в силовых транзисторах и диодах схемы, измеряемые в ходе эксперимента, а также потери в магнитопроводе, вычисляемые с помощью уравнения Штейнметца. В главе представлены схемы и основные параметры макетов, используемых для верификации представленных методов расчета потерь. Произведено описание экспериментальной установки, а также методики проведения эксперимента.

В главе представлены расчеты потерь в сердечнике понижающего и обратноходового преобразователя. Для этого исходя из измеренной индуктивности силового дросселя для понижающего преобразователя или индуктивности первичной обмотки трансформатора для обратноходового преобразователя рассчитывается пульсация тока, а также максимальное и минимальное значения тока. Затем, с помощью полученных данных рассчитываются минимальное и максимальное значения магнитной индукции, определяющие рабочую точку магнитного компонента, а также размах индукции, определяющий потери в сердечнике. Полные потери в сердечнике определяются как

$$P_{core} = P_{\nu}V = C_m f^x \left(\frac{\Delta B}{2}\right)^{\gamma} C_T V, \qquad (4)$$

где V — объем сердечника, P_v — удельная рассеиваемая мощность на единицу объема, f — частота работы магнитного компонента, ΔB — размах магнитной индукции сердечника, C_m , X, Y — эмпирические коэффициенты Штейнметца (предоставляются производителем материала сердечника). C_T — температурный коэффициент.

Далее в главе изложена методика проведения эксперимента, а также представлены результаты измерений потерь в полупроводниковых компонентах испытательных макетов понижающего и обратноходового преобразователя, а также приведены результаты вычислений потерь в магнитопроводе и обмотке магнитного компонента. Для экспериментального определения потерь на силовых полупроводниковых компонентах необходимо измерить и зафиксировать температуру на них в установившемся режиме работы преобразователя. Для регистрации температуры сердечника и полупроводниковых приборов использовался тепловизор Testo 875-i, закрепленный на штативе (рисунок 2). Для того чтобы уменьшить влияние случайных колебаний воздуха на температуру компонентов, в ходе эксперимента также дополнительно использовался вентилятор.

Для нахождения потерь на каждом из транзисторов (или на диоде) с помощью тепловизора Testo 875-і фиксировалась их температуры в рабочем режиме (рисунок 3). Затем находилась мощность, при которой корпус компонента нагревался до той же температуры, что и в установившемся рабочем режиме. Для этого через полупроводниковый прибор пропускался постоянный ток до достижения установившегося значения измеренной ранее температуры. Протекающие токи, а также падения напряжения на компонентах фиксировались с помощью мультиметров GW Instek GDM-78341. Потери в компоненте определялись как произведение постоянного тока и падения напряжения на полупроводниковом приборе. Результаты эксперимента по определению потерь в обмотке дросселя понижающего преобразователя представлены в таблице 2.



Рисунок 2 — Макет понижающего преобразователя



Рисунок 3 — Температура на верхнем (а) и нижнем (б) транзисторе в рабочем режиме

Таблица 2

Результаты измерения потерь в обмотках дросселя

Суммарные потери в преобразователе, мВт		3475
Потери в транзисторах,	Верхний ключ (VT1)	742,76
мВт	Нижний ключ (VT2)	2183,85
Потери в сердечнике, мВт		292
Потери в обмотке, мВт		256,39

понижающего преобразователя.

Аналогичные измерения были проведены и для обратноходового преобразователя с двумя различными топологиями трансформатора. Экспериментальные значения потерь представлены в таблице 3 для топологии без чередования слоев (P-P-S-S) и в таблице 4 для топологии с чередующимися слоями (P-S-S-P).

Таблица 3

Результаты измерения потерь в обмотках трансформатора

обратноходового преобразователя топологии P-P-S-S.

Суммарные потери в преобразователе, мВт	1826
Потери в силовом транзисторе (VT1), мВт	403
Потери в выпрямительном диоде (VD1), мВт	659,9
Потери в сердечнике, мВт	7,5
Потери в обмотке, мВт	755,6

Таблица 4

Результаты измерения потерь в обмотках трансформатора

обратноходового преобразователя топологии P-S-S-P.

Суммарные потери в преобразователе, мВт	1500
Потери в силовом транзисторе (VT1), мВт	236,4
Потери в выпрямительном диоде (VD1), мВт	621,3
Потери в сердечнике, мВт	7,4
Потери в обмотке, мВт	634,9

Далее в главе описывается процесс моделирование потерь в дросселе понижающего преобразователя с помощью метода эквивалентной схемы. Для этого нелинейный элемент, задающий сопротивление обмотки в зависимости от частоты протекающего тока, устанавливается последовательно с идеальным

индуктивным элементом в составе силового каскада преобразователя. Также показана возможность моделирование высокочастотных потерь, путем задания переменного напряжения, прикладываемого к дросселю или тока, протекающего в обмотке. Далее производится верификация предлагаемого метода расчета путем анализа потерь с помощью численного моделирования в программе Ansys Maxwell. Для этого создается двумерная модель дросселя, включающая в себя сердечник и обмотку. Ток в обмотке дросселя формируется с помощью источника тока и определяется кусочно-заданной функцией, повторяющей форму тока в исследуемом макете. В результате моделирования были построены распределение напряженности поля в магнитном компоненте, а также распределение плотности тока в витках, а также определена средняя рассеиваемая мощность. Основные результаты экспериментальных измерений и различных способов моделирования представлены в таблице 5. Для каждого значения рассеиваемой мощности рассчитано относительное отклонение от экспериментальных значений. Моделирование потерь с использованием метода конечных элементов дает относительное отклонение от экспериментального значения в – 12,05 %. Полученное отклонение можно объяснить точностью моделирования САПР, а также точностью самого эксперимента, определяемой погрешностью измерительных приборов, в частности тепловизора, а также инерционностью передачи тепла от кристаллов полупроводниковых компонентов к корпусу.

Существенные различия результатов моделирования с помощью метода эквивалентной схемы с использованием источника тока и экспериментальных результатов объясняются искажениями формы напряжения, прикладываемого к дросселю при таком способе задания рабочей точки. Таким образом, наиболее близким к экспериментальным результатам является моделирование с помощью метода эквивалентной схемы в составе силового каскада преобразователя.

Таблица 5

Способ определения потерь		Рассеиваемая	Относительное
		мощность	отклонение
Экспериментальные результаты		256,4 мВт	-
Аналитический метод расчета		279,7 мВт	9,09 %
Метод	Моделирование в составе схемы	270,6 мВт	5,54 %
эквива-	силового каскада		
лентной	Моделирование с источником	274,3 мВт	6,98 %
схемы	напряжения		
	Моделирование с источником	307,5 мВт	19,93 %
	тока		
Моделирование в Ansys Maxwell		225,5 мВт	-12,05 %

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных значений

Наконец, в четвертой главе производится верификация методики определения потерь в трансформаторе обратноходового преобразователя с помощью численного моделирования в среде Ansys Maxwell. Для этого создается двумерная модель магнитного компонента, включающая в себя сердечник и две обмотки. При этом топология обмоток совпадает с топологией трансформаторов, используемых при аналитических расчетах и в эксперименте. В результате моделирования трансформаторов с двумя топологиями витков было построено распределение напряженности поля на границах обмоток, а также определена рассеиваемая мощность для каждой из топологий.

Результаты экспериментальных измерений, а также численного моделирования и аналитических расчетов для обратноходового трансформатора двух топологий представлены в таблице 6.

Из таблицы видно, что предлагаемый аналитический метод расчета дает отклонение от экспериментальных значений в пределах 16 %, а результаты моделирования с помощью САПР отличается от экспериментальных результатов максимум на 16,52 %, что можно считать допустимым для оценки эффективности топологии витков при проектировании магнитного компонента.

Таблица 6

Топология		Рассеиваемая	Относительное
витков	Спосоо определения потерь	мощность	отклонение
DDCC	Экспериментальные результаты	755,6 мВт	-
P-P-5-5	Аналитический метод расчета	640,9 мВт	-15,18 %
	Моделирование в Ansys	704,8 мВт	-6,72 %
P-S-S-P	Экспериментальные результаты	634,9 мВт	-
	Аналитический метод расчета	562,8 мВт	-11,36 %
	Моделирование в Ansys	530 мВт	-16,52 %

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных значений

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. В результате анализа известных методов оценки и оптимизации высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов предложен способ оценки эффективности топологии трансформатора с точки зрения минимизации эффекта близости, основанный на минимизации квадрата напряженности поля между слоями обмоток, без использования численного моделирования.

2. Предложена методика моделирования потерь в обмотках магнитных компонентов во временной области с помощью метода эквивалентной схемы. Разработан алгоритм определения номиналов компонентов эквивалентной схемы для аппроксимации эффекта близости во временной области. На основе алгоритма написана «программа для аппроксимации эффекта близости во временной области», получено свидетельство № 2023618086 от 18.04.2023 о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3. Разработана методика расчета потерь в магнитных компонентах с отличающаяся чередующимися обмотками. расчетом коэффициентов минимизацией напряженности поля границах обмоток, квадратов на коэффициентов путем чередования обмоток и последующим применением аналитической формулы для расчета потерь в меди, обеспечивающий возможность оптимизации топологии магнитного компонента, a также толщины проводника или диаметра провода без использования метода конечных элементов.

4. Разработана методика расчета потерь в магнитных компонентах с поочередно протекающим током в обмотках, отличающаяся расчетом коэффициентов напряженности поля на границах обмоток в каждом такте работы преобразователя, минимизацией суммы квадратов коэффициентов напряженности в каждом такте путем чередования обмоток магнитного аналитической компонента, применением формулы с усреднением рассеиваемой мощности по периоду работы магнитного компонента. На основе методики написана «программа для оптимизации эффекта близости», получено свидетельство №2024688704 от 26.11.2024 о государственной регистрации программы для ЭВМ.

5. Получены экспериментальные результаты измерения потерь В обмотках дросселя понижающего преобразователя, а также трансформатора обратноходового преобразователя. Экспериментальные результаты отличаются от аналитических расчетов и результатов моделирования с помощью метода эквивалентной схемы В допустимых пределах, что подтверждает работоспособность предложенных методик оптимизации для оценки и высокочастотных потерь в магнитных компонентах.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Веретенников, Н. Ю. Улучшение конструктивных и энергетических параметров импульсных источников питания путем оптимизации высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов / Н. Ю. Веретенников, О. Ю. Денисов, А. В. Башкиров, О. Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 100-105.

2. Веретенников, Н. Ю. Оптимизация высокочастотных потерь в медных проводниках при уменьшении габаритных размеров трансформаторов в обрат-

ноходовых преобразователях электроэнергии / Н. Ю. Веретенников, А. В. Турецкий, В. М. Питолин, К. Д. Ципина // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 7. – С. 20-24.

3. Башкиров, А. В. Измерение высокочастотных потерь в магнитных обмотках понижающего преобразователя / А. В. Башкиров, Я. В. Скитский, Н. Ю. Веретенников // Вестник Воронежского государственного технического университета., 2023. – Т. 19, № 2. – С. 119-123.

4. Веретенников, Н.Ю. Уменьшение габаритных параметров радиотехнических устройств с учетом снижения потерь в трансформаторе источника питания / Н. Ю. Веретенников // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 4. – С. 115-119.

Публикации в международной базе Scopus

5. Glotov, V. V. Winding loss optimization technique for magnetic components / V. V. Glotov, A. V. Bashkirov, A. B. Antilikatorov, N. Y. Veretennikov, T. S. Glotova [et al.] // AIP Conference Proceedings : 8, – Ekaterinburg, 2022. – P. 040002

6. Bashkirov, A. V. Analysis of methods and means for estimating losses in magnetic components caused by proximity effect and skin effect / A. V. Bashkirov, V. V. Glotov, N. Y. Veretennikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 мая 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012001

7. Veretennikov N. Yu. Loss Optimization Approach in Flyback Transformer Windings / N. Yu. Veretennikov, Ya. V. Skitsky // Proceedings – International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2024.

Статьи и материалы конференций

8. Моисеенко, А. А. Моделирование высокочастотных потерь в магнитных компонентах с использованием нейросетевых алгоритмов / А. А. Моисеенко, Н. Ю. Веретенников // Радиолокация, Навигация, Связь: Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б.Я. Осипова: 6 т. — Воронеж, 2022 — стр. 96–105

9. Веретенников, Н. Ю. Методика расчета и оптимизации высокочастотных потерь в магнитных компонентах / Н. Ю. Веретенников, А. А. Моисеенко // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова, Воронеж, 28–30 сентября 2021 года. Том 4. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2021. – С. 185-193.

10. Веретенников, Н. Ю. Моделирование высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов во временной области / Н. Ю. Веретенников // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Воронеж, 18–20 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 140-147.

11. Веретенников, Н. Ю. Верификация метода расчета потерь в обмотке дросселя понижающего преобразователя / Н. Ю. Веретенников, Я. В. Скитский // Актуальные проблемы деятельности подразделений уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 19 октября 2023 года. – Воронеж: Изда-

тельско-полиграфический центр «Научная книга», ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России., 2023. – С. 258-262.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

12. Веретенников, Н. Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618086 Российская Федерация. Программа для аппроксимации эффекта близости во временной области : № 2023616087 : заявл. 30.03.2023 : опубл. 18.04.2023 / Н. Ю. Веретенников; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АЕДОН».

13. Веретенников, Н. Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688704 Российская Федерация. Программа для оптимизации эффекта близости : № 2024688339: заявл. 26.11.2024 : опубл. 29.11.2024 / Н. Ю. Веретенников; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «АЕДОН».

Подписано в печать 26.06.2025 Формат 60х84х16. Бумага для множительных аппаратов. Усл. печ. л.: 1,25. Тираж 80 экз. Заказ № 189. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.