

ОТЗЫВ **официального оппонента**

доктора технических наук Тихонова Андрея Ильича
на диссертационную работу Веретенникова Николая Юрьевича
«МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ В
ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

1. Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность темы исследования обусловлена возрастающими требованиями к эффективности и компактности радиоэлектронной аппаратуры в условиях стремительного развития технологий преобразования электроэнергии. Повышение рабочих частот импульсных источников питания (ИП) требует особого внимания к проблемам тепловых потерь в магнитных компонентах, таких как трансформаторы и дроссели. С увеличением частоты усиливается влияние высокочастотных эффектов — скин-эффекта и эффекта близости, что делает традиционные методы оценки потерь недостаточно точными, а существующие средства численного моделирования чрезмерно трудоемкими и требовательными к вычислительным ресурсам.

Предложение новой методики моделирования, сочетающей аналитическую точность с относительной простотой реализации, особенно актуально в современных условиях, когда требуется быстрое и точное проектирование компонентов ИП. Практическая востребованность данной темы подтверждается широким применением импульсных преобразователей в радиоэлектронике, связи, авиации, медицине и промышленной автоматике.

Таким образом, тема диссертации является современно ориентированной, научно и технически значимой, полностью соответствующей приоритетным направлениям развития радиотехнических систем и технологий.

2. Оценка достоверности полученных результатов и новизны диссертационного исследования

В процессе выполнения диссертационной работы автором использованы методы теории электродинамики, математического моделирования, теории электрических цепей, а также численные методы, реализованные в средах Python, MATLAB и специализированных САПР (Ansys Maxwell, FEMM). Применение фундаментальных физических принципов, в частности уравнений Максвелла, и корректная математическая обработка полученных зависимостей обеспечивают высокий уровень научной достоверности результатов. Сравнение аналитических расчетов, численного моделирования и реальных измерений демонстрирует отклонения не более 16 %, что является допустимым для инженерных расчетов, связанных с моделированием скин-эффекта. Методики

прошли верификацию как с использованием численного моделирования, так и на прототипах, что усиливает доверие к их применимости в инженерной практике.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработана методика расчета потерь в обмотках магнитных компонентов при произвольной форме тока в трансформаторах с чередующимися обмотками, обеспечивающая аналитическую оценку потерь с приемлемой точностью.

- Предложена эквивалентная схема замещения и методика определения номиналов ее компонентов, позволяющая аппроксимировать эффект близости во временной области, что исключает необходимость разложения сигналов в ряд Фурье.

- Предложен алгоритм оптимизации геометрии обмоток магнитного компонента по критерию минимизации высокочастотных потерь без применения численного моделирования на каждом шаге.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методик моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов, которые позволяют существенно упростить и ускорить процесс проектирования импульсных источников питания. Предложенные методы обеспечивают приближенную, но достоверную оценку потерь на раннем этапе проектирования без необходимости применения ресурсоемкого численного моделирования. Разработка реализована в виде программных решений и эквивалентных схем, пригодных для интеграции в SPICE-симуляторы. Эффективность подхода подтверждена экспериментально: при оптимизации топологии обмоток достигнуто снижение потерь до 12 %, что позволяет повысить КПД преобразователя. Полученные результаты внедрены в практическую деятельность, подтверждены актами внедрения и регистрацией программ для ЭВМ, что свидетельствует о высокой прикладной ценности работы.

3. Оценка содержания диссертации, степени ее завершенности, подтверждение публикаций автора

Структура диссертации соответствует теме и цели исследования. Диссертация Веретенникова Н.Ю. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (64 наименования) и приложений, включающих документы о внедрении и регистрации программных продуктов. Работа объемом 126 страниц содержит 47 рисунков и 25 таблиц. Структура логична и полностью соответствует задачам исследования.

Во введении обозначена актуальность темы, сформулированы цель и задачи, обоснована научная новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет обстоятельный обзор теоретических аспектов скин-эффекта и эффекта близости, а также анализ существующих подходов к моделированию потерь. Дается критическая оценка применимости различных методов к реальным условиям работы ИП.

Во второй главе вводится новая методика расчета потерь с учетом чередующихся обмоток и поочередного протекания токов. Приведены точные аналитические выражения для рассеиваемой мощности в слоях обмотки, включая компоненты по постоянному и переменному току. Этот раздел представляет собой важнейший научный вклад автора.

Третья глава посвящена реализации предложенных методик в программной среде. Особый интерес представляет алгоритм аппроксимации сопротивления обмотки, а также метод интеграции полученной эквивалентной схемы в SPICE-моделирование. Это делает предложенную методику практико-ориентированной и легко масштабируемой.

Четвертая глава содержит обоснованную и тщательно выполненную верификацию всех предложенных методов. Проведено сравнение результатов аналитических, численных и экспериментальных измерений. В эксперименте используются макеты понижающего и обратноходового преобразователей, построенные на сердечниках типа ER14.5. Показано снижение потерь до 12 % при оптимальной топологии обмоток.

В заключении обобщены основные результаты, показана их научная и прикладная значимость. Приведены конкретные цифры по снижению потерь и отклонению расчетных значений от экспериментальных.

Судя по содержанию работы, задачи, поставленные автором исследования, полностью решены, а цель работы достигнута. Диссертация обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, является **завершенным научным исследованием**.

Результаты диссертационного исследования, выводы и пункты научной новизны изложены в 11 научных работах, из которых 4 — в изданиях из перечня ВАК, и 3 — в материалах конференций, индексируемых в базе Scopus, что свидетельствует о высоком уровне апробации результатов.

4. Соответствие содержания автореферата диссертации

Автореферат представлен в научном стиле, с четким и логичным изложением основных положений, результатов и выводов диссертации. Автореферат содержит полную и точную информацию о содержании работы, предоставляя читателям все необходимые данные для оценки научной значимости и достоверности исследования.

5. Замечания по диссертационной работе

При изучении материалов диссертации отмечены следующие недостатки:

1. Допущение об однородном распределении индукции магнитного поля между обмотками трансформатора можно считать достаточно корректным для сердечников закрытого типа при большом количестве витков провода малого диаметра. Но в остальных случаях это допущение может привести к большой погрешности. Например, в случае фольговых обмоток скин-эффект приводит к вытеснению тока в торцевые области проводника. При малом количестве

проводников большого диаметра также могут быть проблемы с точностью расчетов.

2. Точность расчета локальных потерь с использованием метода конечных элементов во многом определяется степенью дискретизации расчетной области. Особенно высокие требования к качеству конечно-элементной сетки предъявляются именно при расчете вихревых токов. В диссертации ничего не говорится о качестве сгенерированной конечно-элементной сетки. Поэтому трудно судить и о точности расчета.

3. Реализация алгоритмов моделирования представлена в виде описания результатов и фрагментов кода, однако отсутствует структурированное описание архитектуры программных решений, их интерфейсов и применимости в инженерной практике. Более подробное описание способов практического применения разработанных инструментов могла бы способствовать более широкому внедрению предложенных методик.

4. Некоторые утверждения очень радикальны. Например, «В отсутствие зазора в сердечнике поле отсутствует не только снаружи первичной обмотки, но и внутри вторичной и проявляется только между первичной и вторичной обмоткой», или «Вследствие эффекта близости, ток протекает только со стороны поля на глубине проникновения δ ». Следует использовать более взвешенные формулировки, например, «С учетом принятых допущений можно считать, что...».

5. В ряде мест имеются опечатки (например, «в работах в работах...»), несогласованность предложений, повторение одних и тех же фрагментов текста в разных разделах диссертации (например, абзац, начинающийся с фразы «Если используется сердечник закрытого типа, то...» повторяется 2 раза). Иногда используются термины, которые «режут слух», например «магнитные обмотки», «магнитный ток», «работа по переносу тока», «оптимизация потерь».

Отмеченные недостатки и замечания в целом не ставят под сомнение научную новизну, теоретическую и практическую значимость, а также достоверность научных результатов и не снижают научной ценности и уровня выполненной работы.

6. Заключение

Диссертационная работа Веретенникова Николая Юрьевича представляет собой завершенное, самостоятельное, научно-квалификационное исследование, в котором получены новые научные результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК, и 3 в индексируемых базой Scopus сборниках. Также зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Уровень публикационной активности соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Считаю, что представленная диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13. — Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

диссертация защищена по специальности 05.13.12 — Системы автоматизированного проектирования (электротехника и энергетика)

office@ispu.ru

« 15 » августа 2025 г.

 А.И. ТИХОНОВ

Ученый секретарь Сове

Юлия Вадимовна Вылгина