

ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора технических наук
Битюкова Владимира Ксенофонтовича 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**

На основе изучения диссертации Веретенникова Николая Юрьевича и опубликованных им работ по теме диссертации можно сделать следующие выводы.

1. Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность темы диссертационной работы Веретенникова Н.Ю. обусловлена стремительным развитием радиотехники и электроники, где импульсные источники электропитания (ИЭП) играют ключевую роль в различных областях. Современные требования к массогабаритным параметрам, энергетической эффективности и высокой удельной мощности преобразования электроэнергии стимулируют повышение рабочих частот ИЭП, что, в свою очередь, приводит к росту высокочастотных потерь в обмотках их магнитных компонентов — трансформаторах и дросселях.

На высоких частотах доминирующими факторами, обуславливающими увеличение потерь в обмотках, являются скин-эффект и эффект близости. Эти физические явления приводят к неравномерному распределению тока по сечению проводника, увеличению эффективного сопротивления и, как следствие, к снижению КПД преобразователя, а значит к перегреву электрорадиокомпонентов. Традиционные аналитические методы, такие как подходы Доуэлла и Карстена, хотя и используются, но имеют ограниченную применимость в условиях сложной топологии обмоток, несинусоидальных форм токов и чередующихся слоёв, характерных для современных импульсных преобразователей.

Существующие программные средства численного моделирования, такие как Ansys Maxwell, COMSOL и другие, позволяют достигать результаты с малой погрешностью, однако требуют значительных вычислительных и временных ресурсов, что делает их малоприменимыми на этапах предварительного проектирования и оптимизации. В связи с этим разработка эффективной с радиотехнической, вычислительной и метрологической точки зрения методики моделирования высокочастотных потерь в ИЭП является важной и актуальной задачей современной радиотехники.

Оппонируемая работа Веретенникова Н.Ю. направлена на решение

этой научно-технической проблемы. Автор реализовал комплексный подход, объединяющий аналитические методы и программные инструменты, позволяющие на ранних этапах проектирования ИЭП оценивать потери в обмотках с учетом реальных топологии, формы токов и частотных характеристик. Это особенно важно для разработки высокочастотных источников электропитания, являющихся одними из наиболее термонагруженных блоков радиотехнических систем. Достоверность определения тепловых потерь, в свою очередь, определяет, как конструкторско-технологические, так и эксплуатационные параметры ИЭП.

Таким образом, тема диссертационной работы Веретенникова Н.Ю. является актуальной, научно-обоснованной и полностью соответствует приоритетным направлениям развития радиотехнических систем, где критически важны параметры массогабаритных характеристик и энергопотребления.

2. Оценка достоверности полученных результатов, новизны и практической значимости диссертационного исследования

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе Веретенникова Н.Ю., подтверждена комплексной верификацией: сравнением аналитических расчетов с результатами численного моделирования и экспериментальными результатами, полученными на разработанных импульсных DC/DC преобразователях. Расхождения между расчетными и измеренными значениями потерь не превышали 16 %, что является вполне приемлемым результатом для инженерных расчетов, особенно на этапах предварительного проектирования.

Экспериментальная часть работы выполнена тщательно: описаны методики измерения потерь в обмотках дросселя понижающего DC/DC преобразователя и трансформатора обратноходового DC/DC преобразователя, представлены экспериментальные данные по суммарным потерям, включая вклад транзистора, диода, сердечника и обмоток.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Во-первых, разработана методика моделирования высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов, учитывающая чередующиеся обмотки и токи произвольной формы, что уменьшает погрешность расчетов по сравнению с классическими подходами.

Во-вторых, предложена методика аппроксимации эффекта близости во временной области с помощью эквивалентной схемы замещения, позволяющая интегрировать модель в SPICE-симуляторы для системного анализа.

В-третьих, созданы программные средства, реализующие предложенные методики и позволяющие проводить в реальном масштабе времени оценку потерь и оптимизацию топологии обмоток на ранних этапах

проектирования.

Практическая значимость исследования заключается в разработке и внедрении приборно-методического обеспечения, которые позволили повысить скорость проектирования импульсных источников питания на ранних этапах разработки, обеспечивая хотя и приближенную, но достоверную оценку потерь без необходимости применения ресурсоемкого численного моделирования в специализированных САПР. Предложенные автором подходы реализованы в виде программных решений на языке MATLAB и Python, а также эквивалентных схем, пригодных для интеграции в SPICE-симуляторы, что делает их доступными для широкого круга инженеров.

На две программы («Программа для оптимизации эффекта близости» и «Программа для оптимизации эффекта близости во временной области») получены Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Экспериментальная проверка на макетах понижающего и обратноходового DC/DC преобразователей подтвердила достоверность предложенной методики. Так, при оптимизации конструкции трансформатора обратноходового DC/DC преобразователя за счет чередования обмоток было достигнуто снижение потерь до 12 %, что позволило снизить тепловую нагрузку на трансформатор, а также повысить КПД преобразователя.

Результаты, полученные Веретенниковым Н.Ю. при выполнении диссертационного исследования, внедрены в научно-исследовательскую деятельность ООО «АЕДОН», АО НВП «ПРОТЕК» и АО НПП «Автоматизированные системы связи», а также в образовательную деятельность в ВГТУ.

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

Структура диссертации логична, последовательна, полностью соответствует поставленным целям и задачам исследования и имеет внутреннее единство. Работа объемом 126 страниц содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 64 наименований, а также два приложения, включающих акты внедрения и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Диссертация содержит 47 рисунков и 25 таблиц.

Во введении чётко обоснована актуальность темы, сформулированы объект и предмет исследования, а также цели и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая значимость. Также приведены положения, выносимые на защиту, и кратко охарактеризована структура работы.

Первая глава посвящена анализу существующих методов оценки

высокочастотных потерь. Подробно рассмотрены физические механизмы возникновения скин-эффекта и эффекта близости, а также их влияние на распределение тока в проводниках. Приведены результаты критического анализа аналитических и численных методов, отмечены их достоинства и недостатки.

Вторая глава содержит теоретическую основу разработанной методики. Здесь автор детально описал математическую модель распределения поля в многослойных обмотках, представил вывод выражений для коэффициентов напряженности поля на границах слоев и формулы для расчета потерь. Особое внимание уделено учету несинусоидальных форм токов и чередующихся топологий. Приведены примеры расчетов для различных конфигураций, что позволяет оценить эффективность соответствующих технических решений.

Третья глава посвящена программной реализации методики. Автор описал архитектуру разработанных программ, алгоритмы аппроксимации и генерации SPICE-моделей. Приведены примеры использования программ для сравнения различных топологий обмоток, включая классические и чередующиеся схемы. Показано, что оптимизация топологии позволяет снизить потери до 12 %, что подтверждает практическую ценность разработок.

Четвертая глава посвящена экспериментальной верификации предложенных методик. Изложена схематика разработанных экспериментальных DC/DC преобразователей, методики измерений и результаты сравнения полученных результатов с численным моделированием. Особенно ценным является сопоставление данных, полученных аналитически, в Ansys Maxwell и на реальных макетах. Это создает полную картину достоверности и применимости разработанных методик.

Заключение обобщает полученные результаты, подтверждает достижение цели и решения поставленных задач. Выводы логичны, аргументированы и соответствуют содержанию работы.

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

По теме диссертации опубликованы 13 научных работ, из которых 4 — в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК по специальности, 3 — в материалах конференций, индексируемых в базе Scopus, 4 — в материалах международных и всероссийской научно-технических конференций и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. Соответствие содержания автореферата диссертации

Автореферат выполнен в соответствии с требованиями ВАК и полностью отражает содержание диссертации. Он содержит краткое изложение актуальности, целей, задач, научной новизны, практических результатов и выводов. Все положения, выносимые на защиту, сформулированы четко и логично. Приведены сведения о публикациях, внедрении и апробации результатов. Автореферат позволяет получить полное представление о работе и ее значимости.

5. Замечания по диссертационной работе

При изучении материалов диссертационного исследования отмечены следующие недостатки.

1. Название диссертации значительно шире ее содержания. Ведь при проектировании ИЭП нельзя не учитывать высокочастотные потери в силовых транзисторах. Справедливости ради это отмечено автором на 78 странице диссертации. На 5 странице автореферата сформулировано более корректное название: «Методика расчета высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов».

2. Предложенная оригинальная методика требует знания специфических расчетных процедур, включая вычисление коэффициентов напряжённости поля на границах слоёв и работу с преобразованиями во временной и частотной областях. Это может затруднить ее применение в инженерной практике без дополнительного инструментария и автоматизации.

3. На рисунках 3.4 и 3.5 представлены результаты расчета рассеиваемой мощности на первичной и вторичной обмотках трансформатора с 6 значащими цифрами. Например, 0,349626. Это означает, что относительная погрешность числа составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4} \%$, что практически не реализуемо.

Аналогичное замечание относится и к таблицам 3.3, 4.4, 4.6-4.9 и другим.

4. Нельзя в полной мере согласиться методикой определения рассеиваемой мощности в полупроводниках. Дело в том, что тепловые режимы транзистора и диода в рассматриваемых режимах не тождественны. В этом случае требуется их приближенная количественная оценка.

5. Температура объектов, измеренная тепловизионной системой, не является истинной (реальной), так как не были учтены спектральная излучательная способность объекта, полупрозрачность материалов радиоэлектроники и влияние фонового излучения. Измеренная температура является псевдо температурой. Величину различия истинной температуры и псевдо температуры требуется количественно определить.

Отмеченные недостатки не ставят под сомнение научную новизну,

теоретическую и практическую значимость, а также достоверность полученных научных результатов и не снижают научной ценности и уровня выполненной работы.

6. Заключение

Диссертационное исследование Веретенникова Н.Ю. на актуальную тему «Методика моделирования высокочастотных потерь в импульсных источниках питания» является логично построенной завершенной научно-квалификационной работой, самостоятельно подготовленной на серьезном научном уровне, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения и разработки в области проектирования высокочастотных источников электропитания радиотехнических устройств и систем. Работа отличается высоким уровнем научной новизны, достоверностью результатов и практической значимостью.

Автором решена важная научно-техническая задача — разработка эффективной методики оценки потерь в обмотках магнитных компонентов, сочетающей аналитическую и вычислительную эффективность.

Работа соответствует паспорту специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, в частности пунктам 1, 14 и 16.

Диссертационное исследование «Методика моделирования высокочастотных потерь в импульсных источниках питания» отвечает требованиям пунктов 9-14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Веретенникова Николай Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидат технических наук по научной специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент:

Битюков Владимир Ксенофонович

доктор технических наук,

профессор по кафедре радиоприборов,

диссертация защищена по специальности

05.11.13 — Приборы и методы контроля

природной среды, веществ, материалов и изделий,

профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий,

федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«МИРЭА - Российский технологический университет»

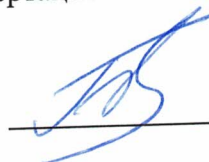
119454 г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

<https://www.mirea.ru>

+7(499)600-80-80 доб. 20515
bitukov@mirea.ru

Я, Битюков Владимир Ксенофонтович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«15» августа 2025 г.

 В. К. Битюков

Подпись Битюкова Владимира Ксенофонтовича заверяю.

Начальник
Управления кадров



М.М. Буханова

